



TALISON TAVARES FERNANDES

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA
NA FLUIDIZAÇÃO DO LEITO FILTRANTE EM PROTÓTIPO
DE FILTRO DE AREIA UTILIZADO NA IRRIGAÇÃO**

LAVRAS-MG

2021

TALISON TAVARES FERNANDES

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA
NA FLUIDIZAÇÃO DO LEITO FILTRANTE EM PROTÓTIPO
DE FILTRO DE AREIA UTILIZADO NA IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Agrícola, para a
obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Fábio Ponciano de Deus
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

TALISON TAVARES FERNANDES

**INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO MAGNÉTICO DA ÁGUA
NA FLUIDIZAÇÃO DO LEITO FILTRANTE EM PROTÓTIPO
DE FILTRO DE AREIA UTILIZADO NA IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Lavras, como parte das exigências do
Curso de Engenharia Agrícola, para a
obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em ____ de ____ de ____.

Prof. Dr. Fábio Ponciano de Deus
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

Ao Triúno Deus da minha salvação.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua graça salvadora e toda providência misericordiosa.

À minha amada esposa Crislaine, meu amor para toda a vida.

A meus pais Daniel e Elci, a meu irmão Tafnes e sua esposa Pamela pelo apoio.

À UFLA e todos os seus servidores por tornarem possível minha formação.

Ao meu supervisor de estágio Maurício e a empresa Lavras Irrigação pela maravilhosa oportunidade de estágio.

A meu orientador, professor Fábio, pela paciência e ajuda para desenvolver este trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo de filtro de areia com detalhe dos seus componentes internos.....	6
Figura 2 – Esquema de filtro de areia executando a filtração.....	7
Figura 3 – retenção de partículas em suspensão num meio poroso.....	8
Figura 4 – Esquema de filtro de areia executando a retrolavagem.	10
Figura 5 – Esquema de montagem do experimento.	16
Figura 6 – Filtro em operação (A), crepina (B), difusor (C).....	16
Figura 7 – Registro do regime de camada fixa referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).	22
Figura 8 – Registro do regime de mínima fluidização referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).	26
Figura 9 – Registro do regime de fluidização particulada referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados do teste de Cochran.....	20
Tabela 2 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk.	21
Tabela 3 – Intervalos de velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de camada fixa (CF) referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).....	23
Tabela 4 – Resumo da análise de variância entre os valores de velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de camada fixa referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).	24
Tabela 5 – Teste Tukey dos valores velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) da fase de camada fixa referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para os resultados significativos no teste F.	24
Tabela 6 – Velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de mínima fluidização (MF) referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).....	27
Tabela 7 – Resumo da análise de variância entre os valores de velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de mínima fluidização referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).	28
Tabela 8 – Teste Tukey dos valores velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) da fase de mínima fluidização referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para os resultados significativos no teste F.....	28
Tabela 9 – Velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de fluidização particulada (PT) referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).....	31
Tabela 10 – Resumo da análise de variância entre os valores de velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de fluidização particulada referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de	

altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).32

Tabela 11 – Teste Tukey dos valores velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) da fase de fluidização particulada referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para os resultados significativos no teste F.32

LISTA DE SÍMBOLOS

D₁₀	diâmetro da abertura da malha da peneira que permite a passagem de 10% do material
D₆₀	diâmetro da abertura da malha da peneira que permite a passagem de 60% do material
CU	Coeficiente de uniformidade
G1	Granulometria média
G2	Granulometria fina
H1	Altura do leito filtrante a 25% da altura útil do filtro
H2	Altura do leito filtrante a 50% da altura útil do filtro
A	Área transversal do filtro
Q	Vazão
V_s	Velocidade superficial da água
CF	Regime de camada fixa
MF	Regime de mínima fluidização
PT	Regime de fluidização particulada
p	Probabilidade de significância
H₀	Hipótese nula
H₁	Hipótese alternativa
GL	Graus de liberdade
QM	Quadrado médio
F	Razão de F

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO.....	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO	3
3.1 Tratamento da água em sistemas de irrigação localizada	3
3.2 Filtros de areia utilizados na irrigação localizada	5
3.3 Fluidização de leitos filtrantes em filtros de areia	11
3.4 Meio filtrante.....	13
3.5 Efeito da água magnetizada nas características físicas e químicas da água	14
4 MATERIAL E MÉTODOS	15
4.1 Local do experimento	15
4.2 Módulo experimental	15
4.3 Leito filtrante	17
4.4 Tratamento magnético da água.....	17
4.5 Procedimento experimental	18
4.6 Análise dos dados.....	19
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
5.1 Análise dos resultados	19
5.1.1 Hipóteses básicas para validade da análise de variância	20
5.1.2 Aditividade e Independência	20
5.1.3 Homogeneidade de variâncias	20
5.1.4 Normalidade.....	21
5.2 Regime de camada fixa.....	21
5.3 Regime de mínima fluidização.....	25
5.4 Regime de fluidização particulada.....	29
5.6 Quanto aos dados não medidos	33
6 CONCLUSÃO.....	34
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

RESUMO

A retrolavagem é a denominação do procedimento de limpeza da camada filtrante em filtros de areia. Ela advém da necessidade de remoção de partículas sólidas orgânicas e/ou inorgânicas acumuladas na camada filtrante durante o processo de filtração que causam um aumento da perda de carga e redução da eficiência de remoção do equipamento. Há uma significativa carência de informações técnico-científicas a respeito da operação do processo de retrolavagem de filtros de areia utilizados na irrigação, bem como do estabelecimento de dependência das relações entre as variáveis intervenientes. Diante disso, objetivou-se neste trabalho avaliar a influência da altura do leito filtrante (25 e 50% da altura útil do filtro), da granulometria da areia (fina e média), e do tipo de água (normal e magnetizada), na velocidade superficial dos processos de retrolavagem e conseqüentemente nos diferentes regimes de fluidização do leito filtrante em um protótipo de filtro de areia utilizado na irrigação. O protótipo de filtro de areia avaliado apresentava corpo de acrílico, permitindo a visualização das expansões da camada filtrante e conseqüentemente da qualificação dos regimes de fluidização. Cada tratamento (combinação da altura do leito filtrante, granulometria de areia e tipo de água) foi avaliado três vezes, sendo medida como resposta a velocidade superficial da água (razão entre o volume estimado pelo método volumétrico pela área transversal do filtro e o tempo de coleta do volume). De maneira geral, a altura do leito filtrante, a granulometria da areia e a água magnetizada influenciaram na velocidade superficial da água no processo de retrolavagem. O efeito da magnetização foi evidente em todos os regimes de fluidização. A altura e granulometria da camada filtrante atuaram na retrolavagem com o leito fluidizado.

Palavras chave: Irrigação, Filtração, Retrolavagem, Expansão de leito filtrante, Entupimento de emissores.

1 INTRODUÇÃO

Com o intuito de aumentar a vida útil dos emissores dos sistemas de irrigação localizada, estes devem utilizar obrigatoriamente sistemas de tratamento físico e químico da água (TESTEZLAF, 2017). Dentre os equipamentos utilizados na irrigação, o filtro de areia se destaca na remoção de matéria orgânica, além de apresentar maior capacidade de remoção de sólidos em suspensão (TESTEZLAF et al., 2014).

O filtro de areia é um reservatório cilíndrico metálico preenchido com material poroso particulado (normalmente areia), que executa a função de remover os sólidos em suspensão na água de irrigação (TESTEZLAF et al., 2014). Seu funcionamento abrange duas operações: filtração e retrolavagem. A filtração consiste em conduzir a água geralmente no sentido descendente ao equipamento, promovendo a passagem forçada da água pela camada filtrante, e consequentemente, a remoção dos sólidos suspensos contidos na água (MESQUITA et al., 2012). Com a remoção dos contaminantes presentes na água e a deposição destes na camada filtrante, há um aumento da perda de pressão do equipamento com o tempo, sendo necessária a realização da sua limpeza (de DEUS et al., 2015). De acordo com SALCEDO et al. (2011), a limpeza de filtros de areia é denominada retrolavagem, onde se possibilita a condução da água no sentido inverso à filtração (normalmente no sentido ascendente), promovendo a expansão da camada filtrante e a remoção dos sólidos retidos no meio.

A eficácia do processo de retrolavagem está diretamente ligada à sua correta operação, onde expansões insuficientes determinarão reduzida remoção dos contaminantes aderidos à camada (de DEUS et al., 2016). De acordo com de DEUS et al. (2020) a expansão do leito filtrante é dependente da magnitude da vazão utilizada, da estrutura do sistema de drenagem do equipamento, da granulometria da areia e da altura do leito filtrante. De acordo com os autores o aumento da granulometria da areia e da altura do leito filtrante determinam a necessidade de maior velocidade superficial para atingir determinado percentual de expansão.

O conhecimento das características hidráulicas do processo de retrolavagem de filtros de areia é fundamental para atingir uma eficácia significativa da limpeza, bem como dos processos de filtração subsequentes (MESQUITA et al., 2019). Vazões e expansões reduzidas determinam limpezas insuficientes, contudo vazões e expansões elevadas determinam perdas de material filtrante (TESTEZLAF, 2008). A correta expansão da camada filtrante no processo de retrolavagem pode ser denominada fluidização da camada filtrante. De acordo com GUPTA e SATHIYAMOORTHY (1999), o processo de fluidização é definido como um fenômeno de

proporcionar propriedades de um fluido a um leito de partículas sólidas, ocasionado pela passagem da água a uma velocidade que proporcione a sua expansão até determinada altura, sem a retirada das partículas que compõem o meio. Basicamente esse processo possui seis tipos de regime ou fases, denominadas como: (1) camada fixa ou estática – as partículas permitem a passagem do fluido sem registrar separação entre elas, sendo a fase que determina a maior perda de pressão; (2) mínima fluidização – estado de transição entre o leito fixo e o leito fluidizado. Esse ponto é caracterizado com o início da ocorrência da estabilização da perda de pressão da camada filtrante, com velocidade de início denominada como “velocidade mínima de fluidização”; (3) fluidização particulada – expansão uniforme da camada filtrante; (4) regime borbulhante – diante do processo de expansão ocorre o aparecimento de borbulhas deslocando-se em sentido vertical até a superfície da camada; (5) fluidização turbulenta – finalizado o fenômeno borbulhante, ocorrem movimentos turbulentos de aglomeração das partículas de vários tamanhos, ficando espaços vazios ao longo da camada durante o processo; e (6) transporte pneumático – com o aumento adicional da velocidade as partículas que compõem o leito filtrante são arrastadas para fora do equipamento, com tendência da perda de pressão diminuir e igualar à situação de filtros sem meio filtrante ou vazio (GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999). Para auxiliar na operação do processo de retrolavagem, a identificação de cada fase do regime de fluidização é essencial para conhecer a relação entre cada tipo de estrutura de drenagem do equipamento combinadas às diferentes granulometrias de areia e alturas do leito filtrante.

Recentemente a comunidade científica tem investigado os benefícios do uso do tratamento magnético da água em diversos usos. Na agricultura o seu uso tem apresentado benefícios no incremento da produção e da qualidade de diversos produtos, bem como a redução do uso da água (Maheshwari e Grewal, 2009; Surendran et al. 2016; Yusuf e Ogunlela, 2017). De acordo com alguns autores o tratamento magnético da água modifica a estrutura física das moléculas de água, bem como sua composição química, diminuindo a tensão superficial e aumentando a viscosidade (Toledo et al. 2008; Mostafazadeh-Fard et al. 2011; Khoshravesh-Miangoleh e Kiani 2014; Surendran et al. 2016). Como o processo de retrolavagem de filtros de areia possui elevada demanda energética para a sua realização (MESQUITA et al., 2012), o uso de água submetida ao tratamento magnético poderá contribuir otimizando as expansões da camada filtrante com menores velocidades superficiais, diminuindo o consumo energético no processo. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a influência da altura do

leito filtrante, da granulometria da areia e do tipo de água (água comum e água magnetizada), na velocidade superficial da água no processo de retrolavagem e conseqüentemente nos diferentes regimes de fluidização do leito filtrante em um protótipo de filtro de areia utilizado na irrigação.

2 OBJETIVO

Avaliar a influência da altura do leito filtrante, da granulometria da areia e do tipo de água (água comum e água magnetizada), na velocidade superficial da água no processo de retrolavagem e conseqüentemente nos diferentes regimes de fluidização do leito filtrante em um protótipo de filtro de areia utilizado na irrigação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Tratamento da água em sistemas de irrigação localizada

Irrigação é uma tecnologia fundamental no processo de produção de bens agrícolas e consiste em técnicas e formas para aplicar água de maneira artificial em plantas, satisfazendo suas necessidades hídricas e visando uma produção ideal (TESTEZLAF, 2017). A irrigação passa por um momento de adaptação a novos paradigmas como altos preços de energia elétrica, leis ambientais mais severas, maior competição e escassez de água (MESQUITA et al., 2012).

Diante deste cenário, a irrigação localizada vem sendo adotada principalmente pela alta eficiência no uso de água que acarreta maior produtividade concomitante ao menor uso de recursos hídricos (TESTEZLAF, 2017). Segundo Testezlaf (2017), a irrigação localizada consiste na aplicação de pequenos volumes de água, com alta frequência, próximo à região radicular da planta. O autor ainda destaca diversos benefícios desse sistema de irrigação quando bem projetado e executado como menor perda de água por evaporação, escoamento superficial e percolação profunda, não interfere na execução dos tratamentos culturais, torna possível a quimização (aplicação de produtos químicos via água de irrigação), atenua o efeito da salinidade (pois a constante aplicação de água dissolve os sais e os afasta para os limites do bulbo molhado), facilita o controle fitossanitário, possui menor necessidade energética por operar a menores vazões e pressões, pode ser automatizada para economia de mão de obra e é adaptável às mais diversas topografias e solos. Em contrapartida, esse sistema de irrigação possui elevado investimento inicial, necessitando de uma unidade central de controle (cabeçal

de controle) e tratamento de água, exige um manejo rigoroso com mão de obra especializada para a instalação, operação e manutenção, pois podem acumular-se na superfície das extremidades do bulbo molhado, causa um crescimento radicular limitado por molhar apenas uma pequena parte do solo com risco para a produtividade em caso de interrupção da irrigação, as linhas laterais de polietileno podem ser danificadas por roedores e insetos, e os emissores são facilmente obstruídos por causa de seus reduzidos diâmetros, necessitando de manutenções periódicas e tratamento da água de irrigação (TESTEZLAF, 2017).

A qualidade da água de irrigação é a maior preocupação no manejo de sistemas de irrigação localizada. O entupimento de emissores por contaminantes físicos, químicos e biológicos afeta de forma negativa todo o sistema por afetar o desempenho hidráulico e ampliar contratempos de manutenção, reduzindo a uniformidade de aplicação e aumentando os custos operacionais (BORSSOI et al., 2012; MESQUITA et al., 2012; TESTEZLAF, 2008). Para minimizar esse problema, Testezlaf (2017) recomenda o uso de tratamento físico, químico, ou ambos, da água de irrigação. Para Haman e Zazueta (1994), o uso do processo de filtração para os sistemas de irrigação localizada é obrigatório para seu sucesso e a qualidade da água é a principal preocupação.

O objetivo dos sistemas de filtragem na irrigação localizada é remover partículas da água de irrigação e impedir a obstrução dos emissores (TESTEZLAF, 2017). A filtração ocorre quando partículas sólidas suspensas, substâncias coloidais e microrganismos são removidos da água de irrigação (MESQUITA, 2010). O processo de filtragem consiste na passagem forçada da água contra um meio filtrante de fibras naturais, sintéticas não tecidas, metálicas ou meio poroso e essa ação pode ser realizada por diferentes tipos de filtro, postos individualmente ou agrupados, como filtros de areia, de disco ou tela (MESQUITA, 2010). Filtros de tela são recipientes fechados de formato cilíndrico com uma tela interna, com diferentes aberturas de malha, por onde a água passa e é filtrada, e filtros de disco consistem em discos de plástico empilhados juntos em uma estrutura, com ranhuras em ambos os lados que definem as dimensões das partículas que serão retidas (TESTEZLAF, 2017).

No Brasil, as fontes superficiais de águas para irrigação, como rios, lagos e reservatórios comumente possuem areia fina, silte, algas e outros materiais orgânicos (TESTEZLAF et al., 2014). O filtro de areia se destaca na irrigação localizada por ser capaz de filtrar tanto material orgânico quanto inorgânico e ainda remover partículas menores que o diâmetro dos poros do particulado filtrante, logo, o correto dimensionamento e operação desse equipamento garante a

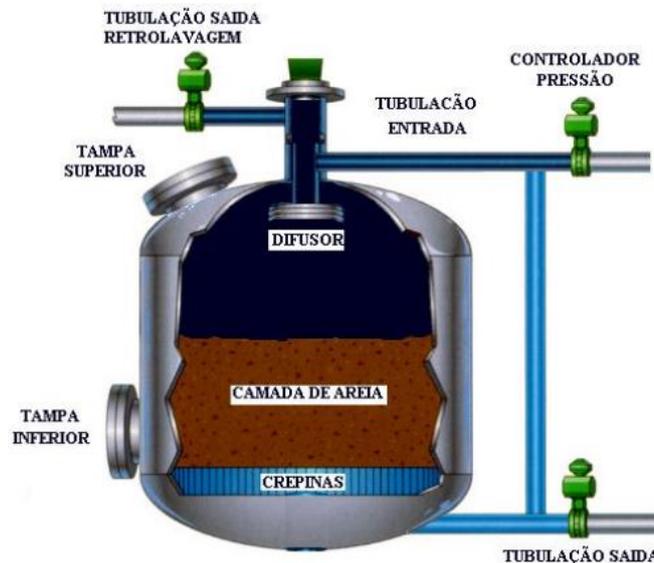
qualidade da água de irrigação, evitando o entupimento dos emissores, garantindo uma uniformidade de aplicação de água e reduzindo os custos operacionais (TESTEZLAF et al., 2014).

3.2 Filtros de areia utilizados na irrigação localizada

Filtros de areia são tanques ou reservatórios cilíndricos metálicos pressurizados que utilizam um diferencial de pressão para forçar a passagem de água por uma camada de material poroso particulado como areia, cascalho ou outro material granulado (TESTEZLAF et al., 2014; WALLER; YITAYEW, 2016). O material particulado em suspensão é retido entre os poros da areia e a diferença de pressão através filtro cresce à medida que os espaços entre os grãos de areia são preenchidos por sedimentos ou material orgânico (WALLER; YITAYEW, 2016). A limpeza da camada filtrante garante a reutilização do filtro sem a troca da areia (WALLER; YITAYEW, 2016). Por operarem em pressões de serviço geralmente acima de 300 kPa (30 mca), os filtros de areia precisam ser construídos de materiais que garantam a não ruptura de suas paredes e partes internas, geralmente placas de aço-carbono, o interior do corpo necessita de tratamento anticorrosivo, para evitar o desgaste nas partes soldadas, e o acabamento externo precisa ter resistência aos raios ultravioletas. (TESTEZLAF et al., 2014).

Os componentes internos dos filtros de areia afetam diretamente seu comportamento hidráulico no processo de filtração e retrolavagem (MESQUITA et al., 2012). A Figura 1 mostra um filtro de areia com suas partes constituintes. Os componentes são, segundo Ramirez (2010), tubulações de entrada e saída, aberturas na parte superior e inferior para enchimento e esvaziamento do tanque, respectivamente, placa difusora para distribuição do líquido, camada de areia filtrante, um sistema de drenagem e registros para controle da pressão e fluxo.

Figura 1 – Modelo de filtro de areia com detalhe dos seus componentes internos.



Fonte: Ramirez (2010).

É importante destacar dois componentes internos do filtro, a placa difusora e o sistema de drenagem. A placa difusora conduz uniformemente o afluente ao meio filtrante e diminui sua energia cinética evitando o direcionamento do jato de água para locais preferenciais e a movimentação ou remoção da camada superficial de areia no processo de filtração (MESQUITA, 2010; TESTEZLAF et al., 2014). O segundo permite a passagem de água filtrada para o sistema de irrigação sem o arraste de material e distribui uniformemente o fluxo reverso da retrolavagem, evitando a ocorrência de caminhos preferenciais da água e pontos mortos (MESQUITA 2010; TESTEZLAF et al., 2014). Os sistemas de drenagem de filtros de areia podem ser divididos em dois tipos, braços coletores de drenagem e drenos (crepinas) (TESTEZLAF et al. 2014). Para ser utilizado corretamente, o operador do filtro de areia deve saber planejar e executar duas operações fundamentais e complementares dos filtros de areia: filtração e retrolavagem (TESTEZLAF et al., 2014). A Figura 2 mostra a execução da filtração onde a água segue o sentido descendente e é forçada através do meio filtrante. Ela entra no filtro pelo difusor e é distribuída sobre o meio filtrante que retém as partículas em suspensão na água, seguindo para os drenos e depois para o sistema de irrigação (MESQUITA, 2010).

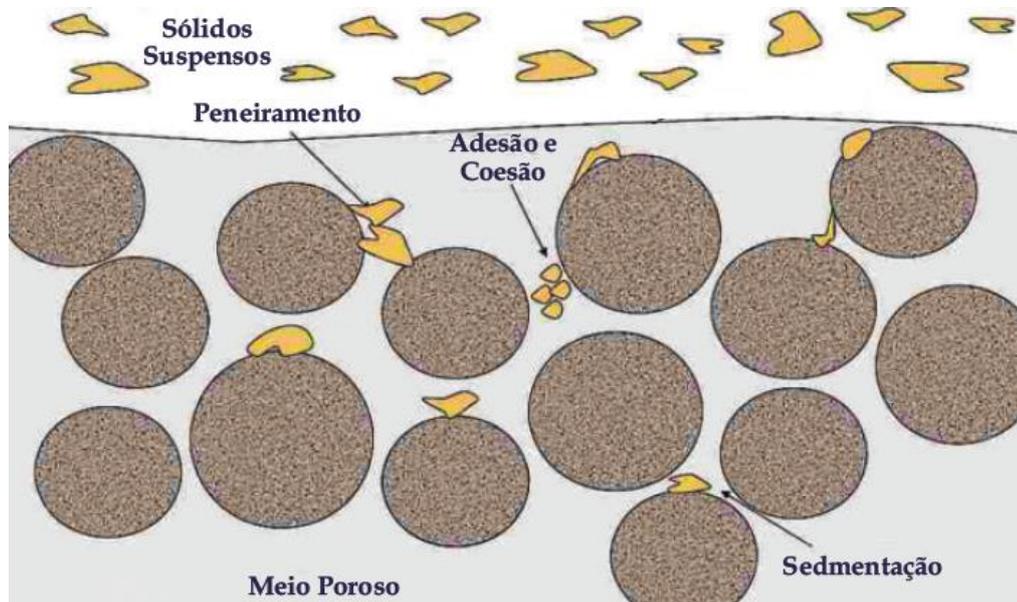
Figura 2 – Esquema de filtro de areia executando a filtração.



Fonte: Yardney Water Filtration Systems, Inc (2020).

Segundo Pizarro Cabello (1996), a filtração através de um meio granular se dá em três etapas: (1) peneiramento – fenômeno superficial na interface água-areia que retém as partículas suspensas maiores que os poros do meio filtrante; (2) sedimentação - cada espaço poroso atua como um decantador, com as partículas em suspensão sendo depositadas entre os poros sobre o material filtrante devido a redução da velocidade da água; (3) adesão e coesão - quando uma partícula em suspensão entra em contato com um grão do material filtrante ou com sedimentos previamente depositados se criam forças de atração elétricas que grudam as mesmas, o que explica como filtros de areia retém partículas muito menores que seus poros. A Figura 3 ilustra como acontecem estes três fenômenos.

Figura 3 – retenção de partículas em suspensão num meio poroso.



Fonte: Testezlaf et al. (2014), adaptado de Civil (2013).

Durante a filtração, as partículas suspensas na água se acumulam ao longo da camada filtrante de maneira desuniforme, entre seus poros, concentrando-se na superfície e diminuindo em direção aos drenos (de DEUS et al., 2016). A performance do filtro de meio poroso é afetada diretamente pelas propriedades das partículas que constituem a camada porosa (WAKEMAN, 2007). Para Wakeman (2007), as propriedades mais importantes são o tamanho, uniformidade, forma e interação com o fluido adjacente. Haman e Zazueta (1994) descrevem o meio filtrante de areia por duas características: coeficiente de uniformidade e tamanho médio da partícula. A uniformidade no tamanho da areia confere maior controle sobre o processo de filtração (HAMAN; ZAZUETA, 1994). A eficiência da filtragem consiste na medida da capacidade de retenção de partículas de um determinado tamanho, sendo que seu valor tende a aumentar inversamente ao tamanho da partícula constituinte do meio filtrante tendendo ao ponto de causar entupimento prematuro dos poros da areia (de DEUS et al., 2015; HAMAN; ZAZUETA, 1994).

Outro parâmetro que influencia na produção de um efluente satisfatório na filtração é a taxa de filtração, definida como a relação entre o deslocamento de determinado volume de água por unidade de tempo e por unidade de área transversal do filtro normal à direção do fluxo da filtração ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) (TESTEZLAF et al., 2014). Para determinada qualidade de água e

granulometria de areia, o tamanho das partículas que atravessam pelo filtro sem serem retidas aumenta com o incremento da taxa de filtração (TESTEZLAF et al., 2014). O aumento da taxa de filtração e a diminuição da granulometria da areia no filtro aumentam a eficiência de remoção das partículas suspensas, mas acentua a perda de carga e diminui a remoção de menores partículas ao longo dos ciclos de filtração e retrolavagem (de DEUS et al., 2015; MESQUITA et al., 2019).

Devido ao processo de filtração, ao reter as partículas suspensas na água, o meio filtrante suja com o passar do tempo, causando mudanças na característica hidráulica do filtro como aumento da perda de carga e até mesmo aumentando a possibilidade da passagem de contaminantes para o sistema de irrigação, comprometendo a eficiência de remoção (TESTEZLAF et al., 2014). A retrolavagem, que é uma mudança na direção de fluxo da tubulação de saída, limpa o leito filtrante e retorna o filtro às condições iniciais de perda de carga e eficiência de remoção (TESTEZLAF, 2008). Segundo Haman e Zazueta (1994), filtros de areia devem ser retrolavados entre intervalos específicos de tempo ou automaticamente, ao se utilizar equipamentos para medir a perda de pressão através do equipamento. Ainda segundo os autores, vazões de retrolavagem devem ser bem ajustadas para evitar a remoção acidental do material, segundo o diâmetro do filtro, a granulometria do meio filtrante e a altura da camada de areia (HAMAN; ZAZUETA, 1994; TESTEZLAF, 2008).

Para Silva et al. (2003), a limpeza do filtro de areia deve ocorrer quando a perda de carga está entre 10 e 20% do filtro limpo. Já para Keller e Bliesner (1990), o valor máximo de perda de carga em um filtro é 70kPa (7 mca), além disso, deve-se proceder com a limpeza do filtro. Uma operação ineficiente da retrolavagem leva a incorreta expansão da camada filtrante e conseqüentemente uma insuficiente remoção das impurezas anteriormente filtradas, comprometendo o processo de filtração subsequente (MESQUITA et al., 2019).

O processo de retrolavagem, Figura 4, é sempre conduzido com água pré-filtrada de um ou mais filtros do conjunto de filtragem (TESTEZLAF et al., 2014). Durante o ciclo de retrolavagem, o fluxo de água é fechado a partir do coletor de admissão pela válvula de retrolavagem e flui sentido ascendente pelo filtro entrando pela válvula de saída. Então a válvula de retrolavagem direciona o fluxo para o cano de descarga e para fora do sistema de irrigação (WALLER; YITAYEW, 2016).

Figura 4 – Esquema de filtro de areia executando a retrolavagem.



Fonte: Yardney Water Filtration Systems, Inc (2020).

Para realizar a retrolavagem é necessário fluidizar a camada de areia no filtro, o que significa conceder propriedades de fluídos a um leito de partículas sólidas através da passagem de água, a tal velocidade que ocorra a expansão do leito sem a perda de material filtrante (GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999). Ramirez (2010) explica que com a expansão da camada de areia as partículas contaminantes são removidas pela diferença de densidade entre estas e aquelas, as partículas mais densas (areia) permanecem no equipamento enquanto as menos densas (contaminantes) são expulsas. Ainda segundo o autor, a retrolavagem é caracterizada como um sistema líquido-sólido de curta duração dividida em uma série de regimes sequenciais. Esses regimes se fundamentam em conceitos da teoria de fluidização e dependem principalmente da velocidade superficial, das propriedades físicas do fluido e diâmetro da areia (RAMIREZ, 2010).

A identificação dos regimes de fluidização em filtros de areia viabilizam a determinação das variáveis de controle da retrolavagem (velocidade de mínima fluidização e velocidade superficial da água) (SALCEDO, 2011). A velocidade de mínima fluidização é essencial ao processo de retrolavagem pois determina o ponto de mudança em que a camada filtrante passa de um estado estático para um estado de movimentação (GUPTA e SATHIYAMOORTHY, 1999). Após o início da fluidização, a camada de areia se expande à medida em que se aumenta a velocidade superficial da água (de DEUS et al., 2020; SALCEDO, 2011). Segundo de Deus

et al. (2020), a expansão da camada de areia em função da velocidade superficial da água absorve interferências da granulometria da areia, da altura do leito e do conjunto construtivo do filtro. O autor ainda salienta que diferentes alturas da camada filtrante não alteram a velocidade de mínima fluidização, porém observou-se influência significativa da granulometria da areia nessa velocidade.

3.3 Fluidização de leitos filtrantes em filtros de areia

Por meio da fluidização um leito de sólidos particulados sustentado sobre uma placa de distribuição de fluidos comporta-se como um líquido pela passagem de um fluido (gás, líquido, ou gás-líquido) a uma vazão acima de um determinado valor crítico, ocorrendo a transferência das propriedades dos fluidos a um leito de sólidos particulados (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999). Dentro do filtro a camada de areia permanece estática mesmo com a água percolando pela areia. No momento em que a água alcança uma velocidade tal que a força de arrasto juntamente com a força flutuante neutraliza a força gravitacional se inicia a fluidização, e o contínuo aumento da velocidade da água proporciona a expansão da camada de areia até determinada altura, com a eventual retirada das partículas que compõem o meio (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999). Esse processo possui seis tipos de regime ou fases: camada fixa ou estática, mínima fluidização, fluidização particulada, regime borbulhante, fluidização turbulenta e transporte pneumático.

Segundo Gupta e Sathiyamoorthy (2019), no regime de camada fixa, a água percola pelos poros da camada de areia sem afetar a porosidade do meio, de forma que as partículas sólidas permanecem fixas em suas posições e a estrutura da camada de areia permanece sem alteração. À medida que o fluxo de água aumenta, a perda de carga no filtro se amplia, sendo alcançado o maior valor de perda de pressão em todos os regimes. O ponto de maior perda de carga através da camada de areia estática marca a transição da camada fixa para a camada fluidizada (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999).

O regime de mínima fluidização é um estado de transição entre o leito fixo e o fluidizado e a velocidade de mínima fluidização é a intersecção das curvas de perda de pressão da camada estática com a camada fluidizada (RAMIREZ, 2010). Quando a velocidade de mínima fluidização é alcançada, a camada de areia existe da maneira mais solta possível sem qualquer aumento no volume ou altura do leito filtrante e o sistema de drenagem que suporta a camada filtrante não experimenta qualquer carga da areia (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999).

Exemplificando, quando o fluxo pela areia torna evidente a fluidização da mesma, de forma que qualquer decréscimo de fluxo acarreta novamente um estado de não fluidização do leito, define-se esse como o início do regime de mínima fluidização (CORSINO, 2009), e em seguida após a fluidização do leito, como exemplifica Gupta e Sathiyamoorthy (1999), um objeto pesado que estivesse em repouso sobre a superfície de um leito estático agora afundaria; da mesma maneira, um objeto leve tenderia agora a flutuar.

Logo em seguida após o alcance da velocidade de mínima fluidização ocorre a entrada no regime de fluidização particulada, com o aumento da vazão acarretando num movimento desordenado tanto na superfície como ao longo da altura do leito e com progressiva expansão do leito filtrante, proporcional ao aumento da velocidade da água (RAMIREZ, 2010). Nesse regime, dentro do filtro de areia, Ramirez (2010) descreve a expansão da camada de areia em contínuos e rápidos movimentos ascendentes, mantendo partículas suspensas, apresentando acréscimo da porosidade desde o início do regime. Para o autor, prevalecem fortes turbulências e efeitos de impulsos de jatos de água da parte inferior do filtro que fluidizam desordenadamente partículas acima da superfície do leito. Ocorre no regime de fluidização particulada movimentos entre os estratos da camada de areia, com partes superficiais da camada sendo substituídos por partes do fundo ou perto do sistema de drenagem (RAMIREZ, 2010).

O regime borbulhante ocorre durante o processo de expansão da camada filtrante, geralmente se apresentando em sistemas gás-sólido. Consiste na formação de bolhas no começo do leito filtrante que ascendem pelo meio, aumentam em tamanho, aglutinam, alcançam a superfície da areia e estouram, podendo, em equipamentos de menor diâmetro, as bolhas se aglutinarem e formarem espaços vazios do diâmetro do equipamento, suspendendo a camada filtrante como um êmbolo, atravessando a mesma com a areia caindo ao longo da coluna do equipamento (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999). No trabalho realizado por Ramirez (2010), o autor observou um colchão de areia suspenso no final do ciclo do regime particulado.

Assim que termina o regime borbulhante inicia-se o regime turbulento, sendo este regime também característico de sistemas gás-sólidos (RAMIREZ, 2010). Não há ponto de transição preciso entre os regimes, mas este é marcado pelo rompimento de grandes bolhas em menores bolhas (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999). Ao invés da formação de borbulhas, ocorre um movimento de aglomeração de partículas de vários formatos e tamanhos com formação de vazios ao longo da camada filtrante (RAMIREZ, 2010).

Com o contínuo aumento da velocidade da água, eventualmente os sólidos são carregados pela água, essa situação corresponde ao transporte pneumático (GUPTA; SATHIYAMOORTHY, 1999). Nesse regime o leito fluidizado encontra-se disperso e com a expulsão da camada para fora do filtro, a pressão no equipamento tende a igualar-se à pressão de filtro vazio (RAMIREZ, 2010).

3.4 Meio filtrante

As características do meio filtrante desempenham papéis importantes na filtração e retrolavagem dos filtros de areia, todavia não existe atualmente uma norma brasileira que indique qual material a ser usado no filtro de areia para irrigação (MESQUITA, 2010) tão pouco existem normas para regular os componentes internos (RAMIREZ, 2010). É recomendada a utilização do método de caracterização física da areia descrito por Haman e Zazueta (1994), método este utilizado tanto por Mesquita (2010) quanto por Ramirez (2010).

Segundo Haman e Zazueta (1994), dois fatores descrevem o meio filtrante usado no filtro, coeficiente de uniformidade (CU) e tamanho médio efetivo (D_{10}). Ambos são necessários para um melhor controle da filtragem. O coeficiente de uniformidade (CU) consiste na razão do tamanho da abertura da peneira que passa 60% da areia do filtro pelo tamanho da abertura da peneira que passa 10% da mesma areia, sendo o valor de 1,5 para CU razoável para os propósitos da irrigação (HAMAN; ZAZUETA, 1994). O tamanho médio da partícula consiste no tamanho da abertura da peneira a qual passa 10% da areia. Também é a medida da menor partícula de areia e dá uma ideia do tamanho de partícula que será removida na filtração (HAMAN; ZAZUETA, 1994). Para Pizarro Cabello (1994), o tamanho das partículas que atravessam o leito filtrante é da ordem de 1/12 a 1/10 do diâmetro efetivo do meio filtrante. O autor ainda escreve que para evitar a obstrução dos emissores da irrigação localizada o meio filtrante deve reter no mínimo partículas suspensas com 1/10 do diâmetro da saída de gotejadores e 1/5 do diâmetro da saída de microaspersores.

Areias muito finas permitem uma ótima filtração, mas acumulam contaminantes mais rápido e causam maior perda de carga, exigindo retrolavagens com maior frequência (HAMAN; ZAZUETA, 1994). Além disso, não permitem uma boa penetração de partículas na camada de areia, ocorrendo um acúmulo na superfície e deixando parte do leito sem utilização. (de DEUS et al., 2016; RAMIREZ, 2010). Em contrapartida, areias grossas são pouco eficientes no processo de filtração, podem causar o entupimento dos emissores da irrigação e necessitam de

maiores vazões para garantir a expansão e limpeza, porém toleram maior tempo de funcionamento sem a necessidade de retrolavagem e a remoção dos contaminantes é mais fácil (RAMIREZ, 2010). A altura do meio filtrante está diretamente ligada à fluidização, Mesquita (2010) cita que a altura do leito filtrante não deve ultrapassar 75% da altura do filtro, dando um espaço para a expansão da areia entre o difusor e o leito filtrante. Pizarro Cabello (1996) recomenda espessuras entre 40 e 60 cm para a camada filtrante em filtros de areia. O autor explica que a altura do leito filtrante influencia na qualidade da filtração até esta altura, além deste ponto somente aumentam o tempo de filtração e de retrolavagem totais. Grandes espessuras de areia também favorecem a formação de crostas de sujeira de difícil limpeza no interior da areia (PIZARRO CABELLO, 1996).

3.5 Efeito da água magnetizada nas características físicas e químicas da água

A água no estado líquido tem suas moléculas ligadas por pontes de hidrogênio e força de *van der Waals*, possui elevado calor específico e de vaporização e tem sua densidade máxima à aproximadamente 4°C (GENEROSO, 2016). Mesmo ela sendo uma substância diamagnética, sofre alterações de suas propriedades se submetida a um campo magnético (AMIRI; DADKHAH, 2006; CHANG; WENG, 2006; GHAURI; ANSARI, 2006; XIAOFENG; BO, 2008). As mudanças que ocorrem na estrutura da água através dos efeitos da magnetização são muito importantes em várias aplicações, como tratamento de água, processos biológicos e biotecnologia (CHANG; WENG, 2006). Zhou et al. (2000) explicam que, como a água possui fortes interações moleculares de pontes de hidrogênio, ela possui um alto ponto de ebulição e alta capacidade termal e descrevem que o efeito do campo magnético sobre a água aumenta as distâncias entre suas moléculas. Zhou et al. (2000) concluem que um campo magnético externo pode enfraquecer as pontes de hidrogênio ou quebrá-las.

Amiri e Dadkhah (2006) observaram em seu trabalho que a tensão superficial da água diminui com o aumento da quantidade de passagens pelo sistema magnetizador. Toledo et al. (2008) encontraram um aumento nos valores de entalpia, viscosidade e tensão superficial da água quando submetida a um tratamento com campo magnético. Esmailnezhad et al. (2017) apontam também para uma redução da tensão superficial da água magnetizada, tanto doce como salgada. Wang et al. (2018) examinando os efeitos de um campo magnético sobre a água concluíram que a mesma teve o calor específico, ponto de ebulição e evaporação alteradas. Ghauri e Ansari (2006) estudando o efeito de um campo magnético sobre a viscosidade da água

observaram que a mesma sob esse efeito passou a ter um valor de viscosidade maior do que a água na situação sem campo magnético.

São esperadas diferenças por causa da alteração na viscosidade pois ela é uma propriedade interna dos fluídos que caracteriza sua resistência ao fluxo ou escoamento (TOLEDO et al., 2008). Como descreve Ramirez (2010), a viscosidade dinâmica do fluido está relacionada com o número de Reynolds, diferença de pressão através do leito filtrante, velocidade de sedimentação da partícula e velocidade de mínima fluidização.

4 MATERIAL E MÉTODOS

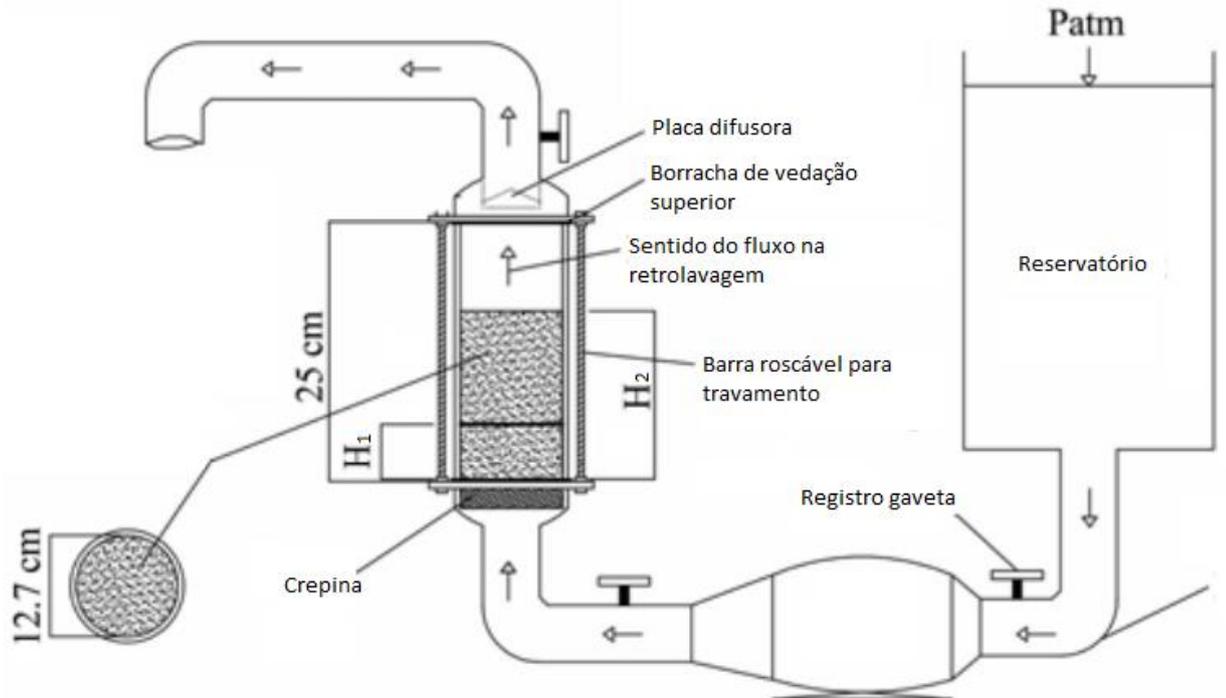
4.1 Local do experimento

O trabalho foi realizado no laboratório de irrigação do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento da Universidade Federal de Lavras.

4.2 Módulo experimental

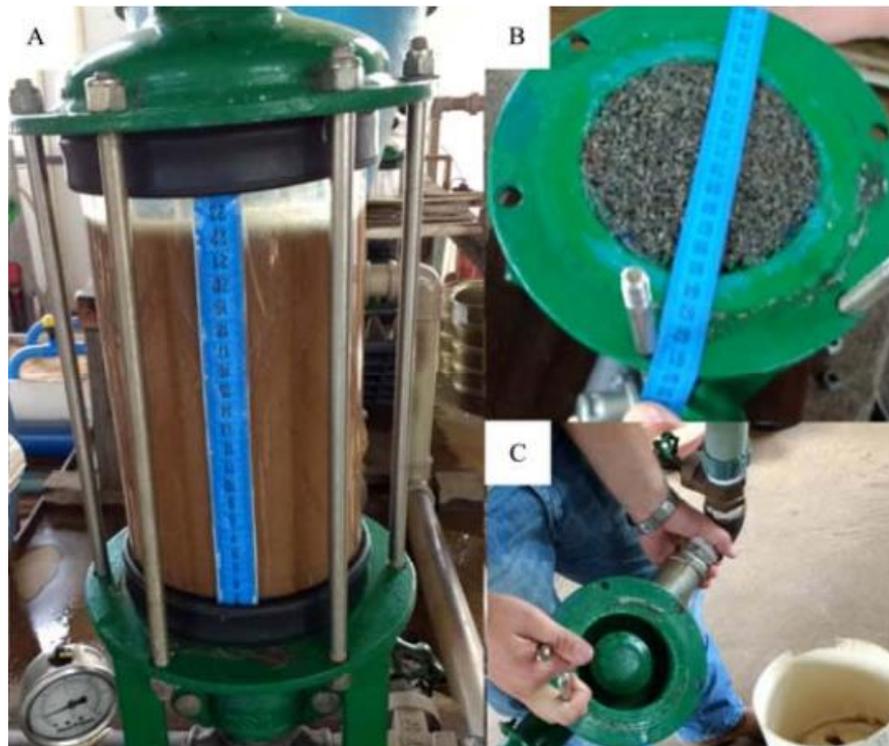
O módulo experimental era composto por uma bomba centrífuga monoestágio modelo BC-91, um protótipo de filtro de areia, um reservatório de água abastecido pela estação de tratamento da Universidade, dois registros gaveta, tubos e conexões de pvc com diâmetro de 50 mm, soldáveis.

Figura 5 – Esquema de montagem do experimento.



Fonte: adaptado de Souza et al., (2019).

Figura 6 – Filtro em operação (A), crepina (B), difusor (C).



Fonte: Souza et al. (2019).

O corpo do filtro consistia em um cilindro de acrílico para possibilitar a observação da expansão da camada filtrante. Na base protótipo ficava o dreno, uma placa porosa que impedia a passagem de areia no sentido da filtração e garantia a distribuição uniforme do fluxo de água na retrolavagem. Na parte superior ficava a placa difusora que era compatível com filtros comerciais. As três partes eram ligadas e aproximadas por barras de aço com pontas roscáveis que atravessavam desde a placa difusora até o dreno. O aperto era feito com porcas tanto na parte superior quanto na parte inferior das barras, comprimindo borrachas nas extremidades do corpo de acrílico, garantindo a vedação.

4.3 Leito filtrante

Utilizou-se a areia sílica como meio filtrante, fornecida pela empresa Moinhos Gerais, do município de Ribeirão Vermelho - MG. Foram avaliadas duas granulometrias de areia (G1 – média, G2 – fina). Em trabalho desenvolvido por Camilo (2019) a areia média (G1) apresentou D_{10} igual à 0.70 mm, e D_{60} igual à 0.93 mm, gerando um coeficiente de uniformidade (CU) de 1.33. Já a areia fina (G2) foi confeccionada nesse trabalho a partir da areia G1, sendo a areia retida nas peneiras de malha 0,85 e 0,60 mm. O uso de duas areias diferentes permite verificar a hipótese de que o aumento da granulometria da areia determina incremento diretamente proporcional à velocidade superficial da água necessária para a fluidização do leito filtrante.

Inicialmente planejou-se a utilização de outra areia sílica com maior granulometria, porém a bomba hidráulica não atendeu a demanda de vazão para a fluidização do leito filtrante. A solução encontrada foi a confecção de uma nova areia a partir da areia média (G1) que é a areia fina (G2).

As alturas de leito filtrante foram definidas como sendo 25 e 50% da altura útil do filtro (25 cm) (H1 e H2 respectivamente). Procurou-se modificar a altura do leito filtrante para verificar a hipótese de que a velocidade superficial da água necessária para a fluidização do leito filtrante é diretamente proporcional à altura do leito.

4.4 Tratamento magnético da água

Para obtenção da água magnetizada foi utilizado um magnetizador Sylocimol Residence[®], da empresa Timol Indústria e Comércio de Produtos Magnéticos. Esse equipamento é composto de imãs orientados, recobertos por uma proteção em aço inox, que submetem a água a um fluxo constante de elétrons e a um campo magnético de 3860 Gauss, com capacidade de magnetizar 1000 L h⁻¹ (TIMOL, 2020).

O magnetizador foi alocado no interior do reservatório de água um dia antes de se realizar os testes com água magnetizada. Com isso podia-se ter certeza do efeito da magnetização descrita pelo fabricante sobre a água do reservatório. Adicionalmente, as avaliações com água magnetizada foram realizadas posteriormente após os testes com água normal.

4.5 Procedimento experimental

Como a retrolavagem consiste na fluidização líquido-sólido da camada filtrante de areia, e conseqüentemente sua expansão, separada em etapas consecutivas também chamadas regimes de fluidização (SALCEDO; TESTEZLAF; MESQUITA, 2011), a expansão dessa camada filtrante de areia é o que permite a remoção de sólidos contidos em seu interior e tal expansão é uma resposta direta à velocidade superficial da água que transpassa a área transversal do filtro. Disso decorre a necessidade do estabelecimento dos parâmetros de velocidade superficial da água (LÓPEZ, 2009) em ocorrência com as fases de fluidização e tendo em vista que segundo Gupta e Sathiyamoorthy (1999), a variável controlada velocidade superficial (V_s) é a mais recomendada para indicar o ponto de transição entre os regimes fluidizados.

Cada tratamento consistiu em combinações da altura do leito filtrante (H1 ou H2), da granulometria da areia (G1 ou G2) e do tipo de água (AC ou AM). Durante os testes, abria-se o registro de gaveta permitindo a passagem do fluxo de água através da camada filtrante de areia, dando início ao processo de retrolavagem. Prosseguia-se com a abertura do registro gaveta até o momento de constatação visual do fim do regime de camada fixa, início do regime de mínima fluidização e início do regime de fluidização particulada. Em cada etapa anteriormente citada prosseguia-se com a coleta de um volume de água em um intervalo de tempo (T), durante o processo de retrolavagem, para medição da vazão (Q) e posteriormente a obtenção da velocidade superficial da água (V_s). Todos os ensaios em cada tratamento foram

feitos em triplicata para obter-se repetibilidade nos dados. Calculou-se a velocidade superficial da água (V_s) pela equação 1:

$$V_s = \frac{V}{AxT} \quad (1)$$

Onde:

V: volume (m^3), T: tempo (h), A: área transversal do filtro (m^2), V_s : velocidade superficial da água (m/h).

4.6 Análise dos dados

Utilizou-se o software estatístico STATISTICA para auxiliar nas análises. Utilizou-se o teste F na análise de variância e o teste Tukey para comparação entre as médias dos tratamentos, ambos com nível de significância de 5%. Analisou-se os dados separando-os pelos regimes de camada fixa (CF), mínima fluidização (MF) e fluidização particulada (PT). A separação dos regimes para análise dos resultados foi necessária para possibilitar a observação de alterações na velocidade superficial causadas pela mudança da altura do leito filtrante, da granulometria da areia e do tipo de água. As hipóteses analisadas foram: para a altura do leito filtrante, H_0 : a altura do leito filtrante possui efeitos semelhantes sobre a velocidade superficial da água e H_1 : a altura do leito filtrante possui efeitos diferentes sobre a velocidade superficial da água; para a granulometria da areia, H_0 : as granulometrias testadas possuem efeitos semelhantes sobre a velocidade superficial da água e H_1 : as granulometrias testadas possuem efeitos diferentes sobre a velocidade superficial da água; para o tipo de água, H_0 : a magnetização da água possui efeitos semelhantes à água comum sobre a velocidade superficial da água e H_1 : a água magnetizada possui efeito diferente sobre a velocidade superficial da água.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos resultados

Primeiro é necessário satisfazer hipóteses básicas para validade dos dados para prosseguir à análise de variância (BANZATTO; KRONKA, 2006). Será utilizado o teste F para comparar as estimativas de variâncias e para aquelas significativas o teste Tukey para comparar a média. No caso, a variável resposta é a velocidade superficial da água (V_s). Os fatores testados

entre os tratamentos são a altura, granulometria e tipo de água. Os valores de velocidade superficial da água usados para os cálculos estão nas Tabelas 3, 6 e 9.

5.1.1 Hipóteses básicas para validade da análise de variância

Sendo este é um experimento inteiramente casualizado, como escreveram Banzatto e Kronka (2006), para possibilitar a efetuação da análise de variância de um experimento em um dado delineamento, deve-se considerar seu modelo matemático e aceitar algumas hipóteses básicas necessárias. Estas hipóteses básicas são aditividade, independência, homogeneidade de variâncias e normalidade (BANZATTO; KRONKA, 2006).

5.1.2 Aditividade e Independência

De acordo com as condições do experimento em estudo, conclui-se que seus resultados são independentes e aditivos. Independentemente pois os fatores altura do leito filtrante, granulometria e tipo de água não interferem entre os tratamentos. Aditivos, pois, a variável resposta sempre segue uma função a partir destes fatores.

5.1.3 Homogeneidade de variâncias

Para tal hipótese foi utilizado o teste de Cochran ao nível de significância de 5%. Como é possível observar na Tabela 1, todos os valores de $C_{\text{calculado}}$ são menores que os de C_{tabelado} . Isso implica a ocorrência de homogeneidade de variância entre os tratamentos.

Tabela 1 – Resultados do teste de Cochran.

Fonte de Variação	$C_{\text{calculado}}$	C_{tabelado}	p
Vs-CF	0.341	$C(8,3) = 0.515$	0.820
Vs-MF	0.400	$C(8,3) = 0.515$	0.633
Vs-PT	0.480	$C(6,3) = 0.616$	0.172

Fonte: do Autor (2020).

5.1.4 Normalidade

A Tabela 2 apresenta os resultados do teste de Shapiro-Wilk, ao nível de significância de 0,05 (5%).

Tabela 2 – Resultados do teste de Shapiro-Wilk.

Fonte de Variação	$W_{\text{calculado}}$	W_{tabelado}	p
Vs - CF	0.967	$W_{(0.05,24)} = 0,916$	0.614
Vs - MF	0.964	$W_{(0.05,24)} = 0,916$	0.528
Vs - PT	0.956	$W_{(0.05,18)} = 0,897$	0.542

Fonte: do Autor (2020).

Os resultados de velocidade para as etapas de CF e MF possuem $W_{(0.05,24)} = 0.916$. Já no caso dos valores de PT, $W_{(0.05,18)} = 0.897$. Como visto na tabela acima, $W_{\text{calculado}}$ foi maior que $W_{(0.05,24)}$ ou $W_{(0.05,18)}$ em todos os conjuntos de dados. Por conseguinte, o valor de p por $P[W > W_{\text{calculado}}]$ foi sempre maior que 0.05. Assim, podemos aceitar com nível de significância de 5% que as amostras provêm de um conjunto de dados normal.

5.2 Regime de camada fixa

Na Figura 7 está ilustrado o regime de camada fixa para as diferentes combinações entre altura de leito filtrante, granulometria de areia e tipos de água. Na Tabela 3 encontra-se a faixa de velocidade superficial (V_s) referente ao regime de camada fixa para cada tratamento.

Figura 7 – Registro do regime de camada fixa referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).



Fonte: do Autor (2020).

Tabela 3 – Intervalos de velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de camada fixa (CF) referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).

Camada Fixa (CF)		Granulometria da areia	
Tipo de Água	Altura (H)	G1 (média)	G2 (fina)
Água Comum	25%	0 - 16.95	0 - 17.43
		0 - 14.33	0 - 14.83
		0 - 17.89	0 - 16.78
	50%	0 - 18.97	0 - 17.29
		0 - 19.63	0 - 15.39
		0 - 17.14	0 - 11.92
Água Magnetizada	25%	0 - 15.87	0 - 18.29
		0 - 19.36	0 - 16.62
		0 - 19.32	0 - 15.73
	50%	0 - 14.34	0 - 17.18
		0 - 15.45	0 - 18.39
		0 - 15.79	0 - 16.26

Fonte: do Autor (2020).

Este é o primeiro regime observável. Apesar de a água fluir no sentido da retrolavagem, ela não consegue expandir a camada de areia. À medida que se abre o registro e aumenta-se a vazão, percebe-se a trepidação dos grãos de areia superficiais preliminarmente a um levantamento mínimo da camada, o que indicava que o regime seguinte estava por começar, acontecimento também observado por Ramirez (2010). É importante essa caracterização pois muitos sistemas podem estar realizando a retrolavagem sem ocorrer a expansão, acarretando em ineficiência na limpeza da mesma. Na Tabela 4 está apresentada o resultado da análise de variância das velocidades superficiais mostradas na Tabela 3 para as combinações de altura da areia, granulometria e tipo de água.

Tabela 4 – Resumo da análise de variância entre os valores de velocidade superficial (Vs) ($m h^{-1}$) para o regime de camada fixa referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).

Fonte de Variação	GL	QM	F
ALTURA G1 AC	1	7.178	2.832
ALTURA G2 AC	1	3.305	0.715
ALTURA G1 AM	1	13.410	5.864
ALTURA G2 AM	1	0.240	0.170
GRANULOMETRIA H1 AC	1	0.003	0.001
GRANULOMETRIA H2 AC	1	20.687	4.560
GRANULOMETRIA H1 AM	1	2.546	0.897
GRANULOMETRIA H2 AM	1	6.536	7.604
MAGNETIZAÇÃO H1 G1	1	4.802	1.297
MAGNETIZAÇÃO H1 G2	1	0.420	0.239
MAGNETIZAÇÃO H2 G1	1	17.223	0.017*
MAGNETIZAÇÃO H2 G2	1	8.737	2.042

Nota: * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns - não significativo ao nível de 5% probabilidade.

Fonte: do Autor (2020)

Na Tabela 5 está apresentado o resultado do teste Tukey para os resultados significativos encontrados na Tabela 4.

Tabela 5 – Teste Tukey dos valores velocidade superficial (Vs) ($m h^{-1}$) da fase de camada fixa referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para os resultados significativos no teste F.

Altura	Granulometria	Tipo de água	Média
H2	G1	AC	18.58 a
		AM	15.19 b

Nota: Médias seguidas por letras diferentes se diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Fonte: do Autor (2020)

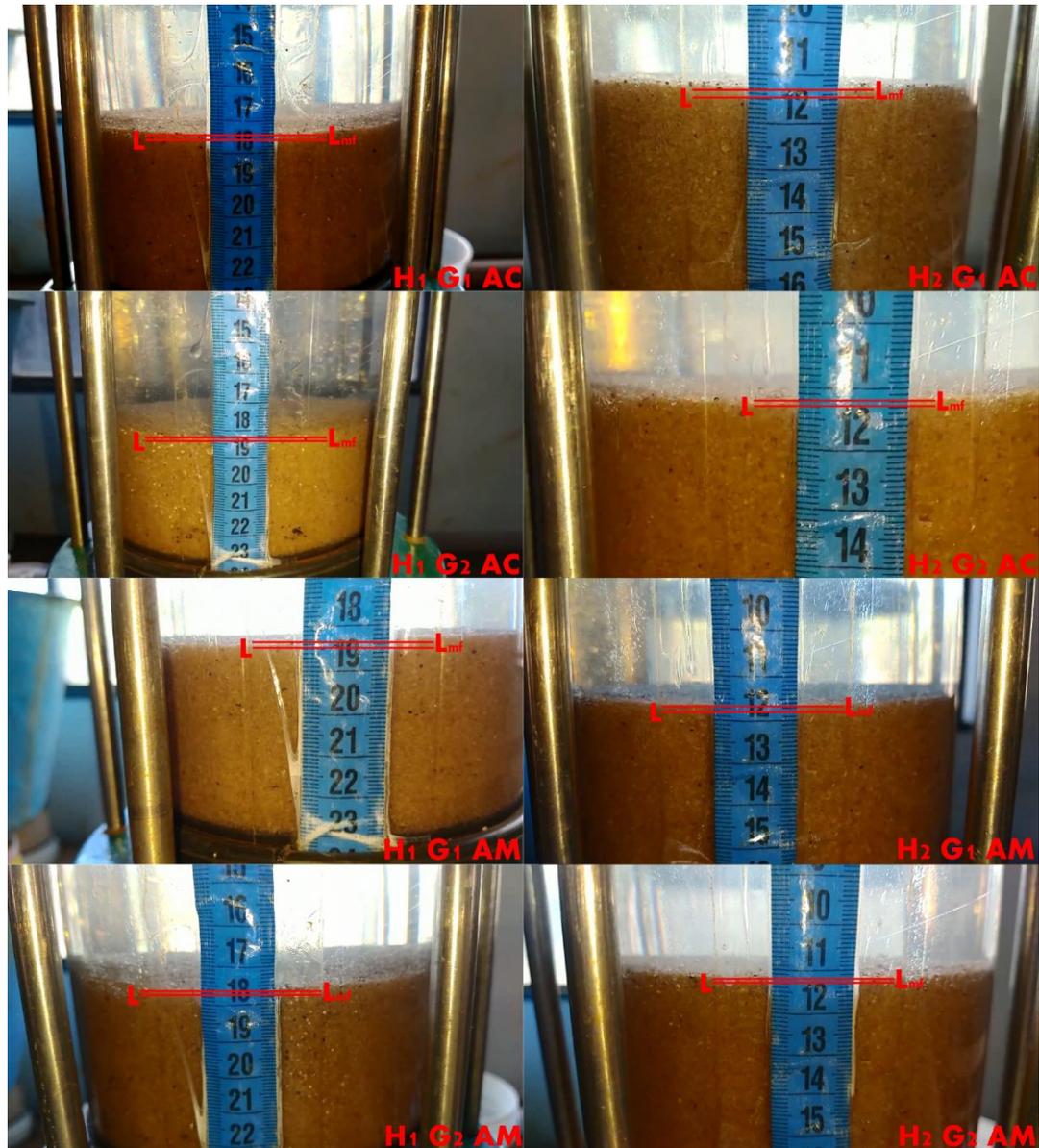
Os resultados apresentados na Tabela 5 mostram que houve uma redução no intervalo de velocidade do regime de camada fixa. Ocorreram diferenças causadas pela magnetização da

água entre os tratamentos H2 G1 AC e H2 G1 AM no regime. A água magnetizada, segundo Ghauri e Asari (2006) e Toledo et al. (2008), possui maior viscosidade e diferentes interações moleculares. Para Ramirez (2010), a perda de pressão durante a camada estática depende do fluxo, da granulometria, da esfericidade e da viscosidade do fluido. A redução na velocidade limite no regime de camada fixa para o tratamento tem como premissa as mudanças nas propriedades físicas e químicas da água, como a viscosidade. E ainda, este resultado pode ser considerado benéfico para a operação do filtro pois houve uma menor necessidade de velocidade da água para o levantamento da areia, logo, menor uso de energia.

5.3 Regime de mínima fluidização

Na Figura 8 está mostrado o regime de mínima fluidização com detalhe da expansão que caracteriza a saída do regime de camada fixa para o regime de mínima fluidização. De acordo com Ramirez (2010), o evento se iniciava quando a passagem de água levantava a camada de areia, sendo tal movimento quase imperceptível (por volta de 1 mm de expansão). No momento que essa expansão era observada mediu-se a vazão da retrolavagem.

Figura 8 – Registro do regime de mínima fluidização referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).



Fonte: do Autor (2020).

Na Tabela 6 estão os valores observados da velocidade superficial (V_s), ou no caso, velocidade de mínima fluidização (V_{mf}), para cada tratamento.

Tabela 6 – Velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de mínima fluidização (MF) referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).

Mínima Fluidização (MF)		Granulometria da areia	
Tipo de água	Altura (H)	G1 (média)	G2 (fina)
Água Comum	25%	19.60	18.99
		21.59	20.09
		21.54	18.78
	50%	25.04	18.06
		24.17	20.34
		22.63	19.10
Água Magnetizada	25%	17.36	23.12
		20.23	22.20
	50%	22.95	20.00
		17.97	22.17
		21.95	20.23
		20.30	18.89

Fonte: do Autor (2020).

O resultado da análise de variância das velocidades superficiais observados na Tabela 6 para as combinações de altura da areia, granulometria e tipo de água está apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 – Resumo da análise de variância entre os valores de velocidade superficial (Vs) ($m h^{-1}$) para o regime de mínima fluidização referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).

Fonte de Variação	GL	QM	F
ALTURA G1 AC	1	13.821	9.914*
ALTURA G2 AC	1	0.021	0.023
ALTURA G1 AM	1	0.017	0.002
ALTURA G2 AM	1	6.075	3.871
GRANULOMETRIA H1 AC	1	3.970	4.433
GRANULOMETRIA H2 AC	1	34.277	24.547*
GRANULOMETRIA H1 AM	1	3.820	0.735
GRANULOMETRIA H2 AM	1	0.144	0.063
MAGNETIZAÇÃO H1 G1	1	0.809	0.177
MAGNETIZAÇÃO H1 G2	1	9.289	6.061
MAGNETIZAÇÃO H2 G1	1	22.540	8.221*
MAGNETIZAÇÃO H2 G2	1	0.529	0.566

Nota: * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns - não significativo ao nível de 5% probabilidade.

Fonte: do Autor (2020)

Na Tabela 8 está apresentado o resultado do teste Tukey para os resultados significativos encontrados na Tabela 7.

Tabela 8 – Teste Tukey dos valores velocidade superficial (Vs) ($m h^{-1}$) da fase de mínima fluidização referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para os resultados significativos no teste F.

Altura	Granulometria	Tipo de água	Média
H1	G1	AC	20.91 a
H2			23.94 b
H2	G1	AC	23.94 a
	G2		19.16 b
H2	G1	AC	23.94 a
		AM	20.07 b

Nota: Médias seguidas por letras diferentes se diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Fonte: do Autor (2020)

Através da Tabela 8 é possível observar que a altura do leito filtrante, granulometria da areia e tipo de água influenciaram significativamente a velocidade de mínima fluidização. Entre os tratamentos H1 G1 AC e H2 G1 AC, no regime de mínima fluidização, pode-se dizer que quanto menor o leito filtrante menor será a velocidade de mínima fluidização. Tal resultado diverge dos valores encontrados por Ramirez (2010) e de Deus et al. (2020). Para ambos, a mudança na altura das camadas avaliadas em seus experimentos não afetou a velocidade de mínima fluidização.

Para os tratamentos H2 G1 AC e H2 G2 AC, neste regime foi obtido, em média, menor velocidade de mínima fluidização para granulometria mais finas. Este resultado corrobora com o encontrado por de Deus et al. (2020), que afirma o aumento da velocidade de mínima fluidização com o aumento da granulometria da camada de areia. Semelhantemente, Ramirez (2010), explica que areias mais finas necessitam de menor velocidade superficial para serem levantadas.

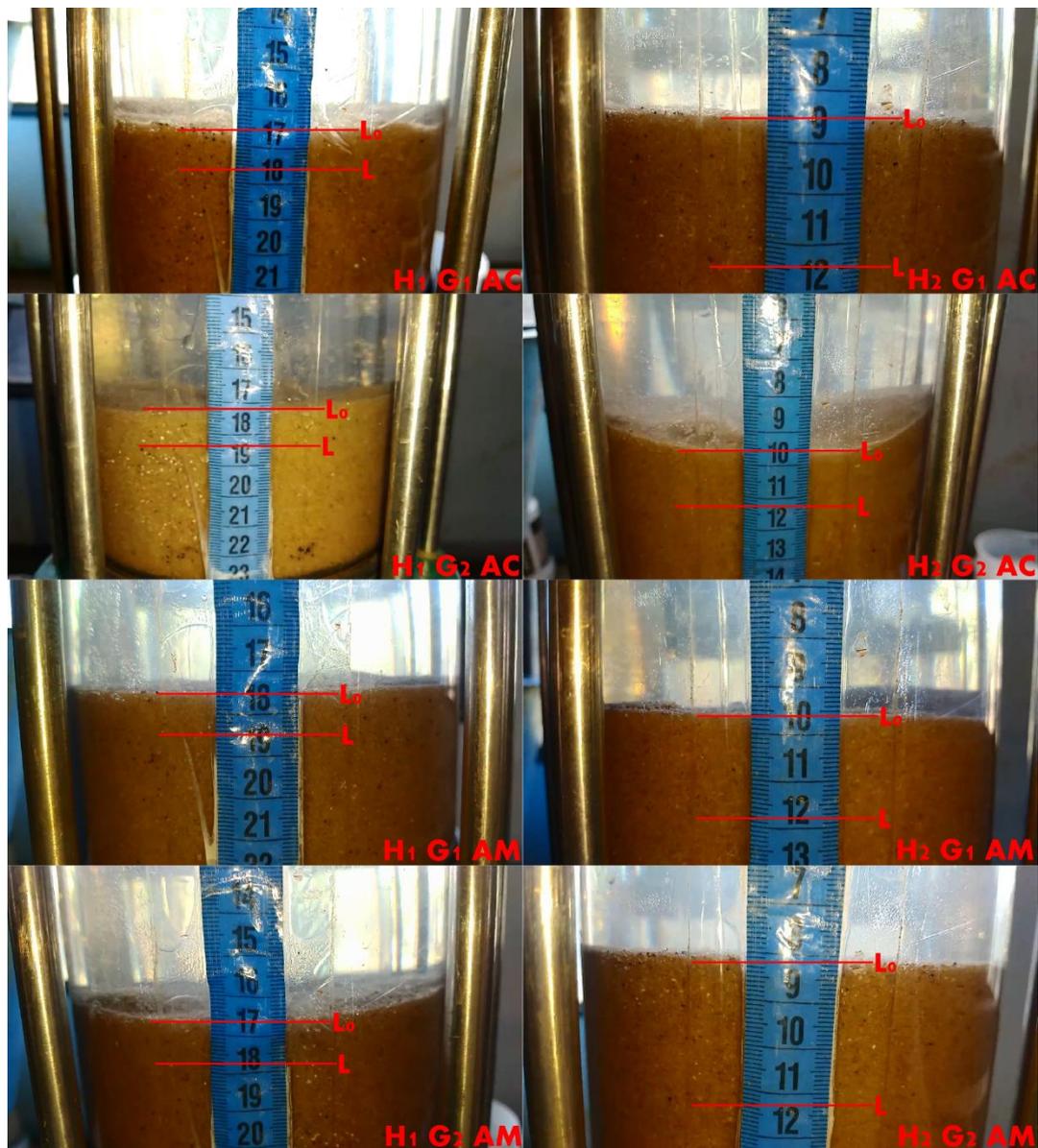
Para o impacto da água magnetizada sobre os tratamentos H2 G1 AC e H2 G1 AM, neste regime, pode-se dizer que tal efeito diminuiu, em média, a velocidade de mínima fluidização. De maneira geral a magnetização da água determinou efeitos significativos no tratamento com leito filtrante na altura H2 e granulometria G1. A média de velocidade superficial necessária para o fim do regime de camada fixa e início do regime de mínima fluidização foi menor no uso da água magnetizada.

Nesse sentido, o efeito causado pela magnetização foi benéfico à retrolavagem por necessitar de menor energia cinética para a fluidização da areia. O fato do regime particulado do mesmo tratamento não ter apontado um efeito conclusivo da magnetização pode estar relacionado com a expansão e aumento da porosidade do meio filtrante que reduzem significativamente a interação líquido-sólido, logo, as mudanças causadas pela magnetização da água, como a alteração na viscosidade e tensão superficial (AMIRI; DADKHAH, 2006; ESMAEILNEZHAD et al., 2017; CHANG; WENG, 2006; GHOURI; ANSARI, 2006; TOLEDO et al., 2008) e a interação destas com a areia nos regimes iniciais de fluidização pode ter sido reduzida ao ponto de não transparecerem diferenças no teste estatístico.

5.4 Regime de fluidização particulada

Pode ser visualizada na Figura 9 a a expansão característica do regime fluidização particulada. No momento em que se observou-se a presença de areia em suspensão dentro do filtro, procedia-se com a medição da vazão. Na Tabela 9 encontram-se os valores de velocidade superficial da água (V_s) para o regime de fluidização particulada.

Figura 9 – Registro do regime de fluidização particulada referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).



Fonte: do Autor (2020).

Tabela 9 – Velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de fluidização particulada (PT) referente ao processo de retrolavagem de um protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).

Fluidização Particulada (PT)		Granulometria da areia	
Tipo de água	Altura (H)	G1 (média)	G2 (fina)
Água Comum		57.30	55.36
	25%	58.75	46.59
		64.22	50.75
		53.15	50.29
	50%	54.28	49.65
		54.53	51.26
Água Magnetizada		-	55.22
	25%	-	56.07
		-	52.87
		49.32	-
	50%	51.86	-
		53.02	-

Fonte: do Autor (2020).

Como pode ser observado na Tabela 9, os valores não computados decorrem de que a bomba hidráulica não conseguiu atender a demanda volumétrica necessária para possibilitar a expansão da camada de areia nesses tratamentos. Não é possível afirmar que as velocidades medidas seriam diferentes ao nível de significância de 5%, mas é importante destacar que o fato ocorreu justamente em dois tratamentos com água magnetizada. Mesmo na Figura 9 é possível observar menos movimentação turbulenta nos tratamentos H1 G1 AM e H2 G2 AM em contradição com os demais. Na Tabela 10 está apresentado o resultado da análise da variância das velocidades superficiais da Tabela 9 para as combinações de altura da areia, granulometria e tipo de água.

Tabela 10 – Resumo da análise de variância entre os valores de velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) para o regime de fluidização particulada referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para as diferentes combinações de altura do leito filtrante (H1 e H2), granulometrias de areia (G1 e G2) e tipos de água (AC e AM).

Fonte de Variação	GL	QM	F
ALTURA G1 AC	1	55.920	8.054*
ALTURA G2 AC	1	0.380	0.038
ALTURA G1 AM	1	-	-
ALTURA G2 AM	1	-	-
GRANULOMETRIA H1 AC	1	126.710	7.773*
GRANULOMETRIA H2 AC	1	19.280	32.280*
GRANULOMETRIA H1 AM	1	-	-
GRANULOMETRIA H2 AM	1	-	-
MAGNETIZAÇÃO H1 G1	1	-	-
MAGNETIZAÇÃO H1 G2	1	21.920	1.992
MAGNETIZAÇÃO H2 G1	1	10.010	4.859
MAGNETIZAÇÃO H2 G2	1	-	-

Nota: * - significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns - não significativo ao nível de 5% probabilidade.

Fonte: do Autor (2020)

Na Tabela 10 está apresentado o resultado do teste Tukey para os resultados significativos encontrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Teste Tukey dos valores velocidade superficial (V_s) ($m\ h^{-1}$) da fase de fluidização particulada referente ao processo de retrolavagem do protótipo de filtro areia para os resultados significativos no teste F.

Altura	Granulometria	Tipo de água	Média
H1	G1	AC	60.08 a
H2			53.98 b
H1	G1	AC	60.08 a
	G2		50.89 b
H2	G1	AC	53.98 a
	G2		50.39 b

Nota: Médias seguidas por letras diferentes se diferem ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Tukey.

Fonte: do Autor (2020)

Para o regime de fluidização particulada, de acordo com a Tabela 11, a maior altura do leito filtrante, entre os tratamentos H1 G1 AC e H2 G1 AC, obteve menor média de velocidade inicial. Entretanto, para de Deus et al. (2020), areia grossas combinadas com maiores alturas do leito filtrante necessitam de maiores velocidades superficiais para expandir. Contrapondo os resultados obtidos no presente estudo.

Para os tratamentos H1 G1 AC e H1 G2 AC, e H2 G1 AC e H2 G2 AC, a granulometria mais fina nestes necessitou de menor velocidade superficial para o início do regime de fluidização particulada. O ocorrido igualmente é relatado por de Deus et al. (2020) e Ramirez (2010).

Com relação aos resultados que acusam diferenças significativas na V_s em diferentes regimes, causadas pela granulometria do meio filtrante, Souza et al. (2019) notou que a granulometria interfere no comportamento da relação velocidade superficial e expansão de cada granulometria, aproximando as relações a equações de primeira ordem.

Como a granulometria G1 e G2 são muito próximas, é possível que as equações lineares que as descrevem possuem, no começo do processo da retrolavagem, velocidades superficiais iniciais próximas e, à medida que ocorre a expansão e a entrada em outros regimes de fluidização, o mesmo ponto de velocidade superficial das duas granulometrias passa a se encontrar horizontalmente distante devido à diferença na curva de cada equação. Ou seja, quanto maior o valor de expansão do leito filtrante, os valores de velocidade superficial para o início do regime particulado divergem quanto maiores as diferenças entre as granulometrias. Então, sendo as granulometrias muito próximas, resultados de V_s que iriam acusar diferenças estatísticas se encontrariam em situação de maior expansão do leito filtrante.

5.6 Quanto aos dados não medidos

A bomba centrífuga utilizada neste trabalho não conseguiu oferecer vazão suficiente para que dois tratamentos com água magnetizada entrassem no regime de fluidização particulada (H1 G1 AM e H2 G2 AM). A presença destes dados provavelmente traria resultados diferentes, a julgar que a impossibilidade da medição se deu pelo fator água magnetizada.

6 CONCLUSÃO

- Os efeitos da altura e granulometria da camada de areia sobre a velocidade superficial da água na retrolavagem foram percebidos em momentos de leito filtrante fluidizado.
- A magnetização da água na retrolavagem, ao contrário da altura e granulometria, influenciou a velocidade superficial da água em momentos de menor expansão da camada de areia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMIRI, M.C.; DADKHAH A.A. **On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment**. *Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp.*, 278 (2006), p. 252-255.

BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. Jaboticabal: Funep, 4.ed. 257 p. 2006.

BORSSOI, A. L. et al. **Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set**. *Engenharia Agrícola*, 2012. 32(4): p. 718–726.

CAMILO, L. W. **Eficiência de limpeza do processo de retrolavagem de um protótipo de filtro de areia**. Universidade Federal de Lavras, 2019.

CHANG, K.-T.; WENG, C.-I. **The effect of an external electric field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation**. *J. Appl. Phys.*, 100 (2006), p. 43917-43922.

CORSINO, P. L. L. **Simulación numérica de un lecho fluido bidimensional para la determinación de la velocidad de mínima fluidización**. Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

De DEUS, F. P.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. **Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação**. 2015. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 50(10), p. 939 a 948.

De DEUS, F. P.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. **Assessment methodology of backwash in pressurized sand filters**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2016, 20, p. 600 a 605.

De DEUS et al. **Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation**. *Biosystems engineering*, 192 (2020), p. 188 a 198.

ESMAEILNEZHAD, E. et al. **Characteristics and applications of magnetized water as a green technology**. *Journal of Cleaner Production*, 161, 2017, p. 908-921.

GENEROSO, T. N. **Efeito da magnetização nas características da água e nos parâmetros de transporte de fósforo no solo**. Universidade Federal de Viçosa, 2016.

GHAURI, S.A.; ANSARI, M.S. **Increase of water viscosity under the influence of magnetic fields**. *J. Appl. Phys.*, 100 (2006), p. 66101-66102.

GUPTA, C.K.; SATHIYAMOORTHY, D. **Fluid bed technology in materials processing New York**. 1999., 512 p.

HAMAN, D. Z.; ZAZUETA, F. S. **Media filters for trickle irrigation in Florida**. Gainesville: University of Florida, 1994. 5 p. (Fact Sheet AE-57). Disponível em:

<http://edis.ifas.ufl.edu/WI008> acesso em: junho 2020.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652 p.

KHOSHRAVESH-MIANGOLEH M.; KIANI A.-R. **Effect of magnetized water on infiltration capacity of different soil textures**. Soil Use and Management. 2014.

LÓPEZ, L.P. **Simulación numérica de un lecho fluido bidimensional para la determinación de la Velocidad de mínima fluidización**. Tesis grado. Universidad Carlos III de Madrid. España. Escuela politécnica superior, Área de ingeniería térmica. Noviembre 2009.

MAHESHWARI B. L.; GREWAL, H.S. **Magnetic treatment of irrigation water: its effects on vegetable crop yield and water productivity**. Agric. Water Manag., 96 (2009), p. 1229-1236.

MESQUITA, M. **AVALIAÇÃO DOS COMPONENTES HIDRÁULICOS E DO MATERIAL FILTRANTE EM FILTROS DE AREIA UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO**. Dissertação de mestrado, UNICAMP, Campinas. 2010.

MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; SALCEDO RAMIREZ, J. C. **The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss**. Agricultural Water Management, 115 (2012), p. 178 a 185.

MESQUITA, M.; de DEUS, F. P.; TESTEZLAF, R.; DIOTTO, A. V. **Removal efficiency by pressurized sand filters during the filtration process**. Desalination Water Treatment, 161 (2019), p. 132 a 143.

B. MOSTAFAZADEH-FARD et al. **Effects of Magnetized Water on Soil Chemical Components underneath Trickle Irrigation**. American Society of Civil Engineers, 2011.

PIZARRO CABELLO, F. 1996. **Riegos Localizados de Alta Frecuencia**. 3ª edição. Mundi Prensa, Madrid.

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

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

SILVA, L. G. F.; MANTOVANI, E. C.; RAMOS, M.M. **Irrigação localizada**. In: MIRANDA, J.H.; PIRES, R.C.M. Irrigação. Piracicaba: SBEA, 2003. v.2, Cap.12, p.259-309. (Série Engenharia Agrícola)

SHAPIRO, S. S. e WILK, M. B. (1965). **An analysis of variance test for normality (complete samples)**. Biometrika 52, p. 591-611.

SOUZA, A. H. C. et al. **Backwash process in a sand filter prototype used in irrigation**. International Agricultural Engineering Journal. Abril, 2019 Vol. 21, No. 1, p. 109.

SURENDRAN, U.; SANDEEP, O.; JOSEPH, E. J. **The impacts of magnetic treatment of irrigation water on plant, water and soil characteristics**. Agric. Water Manag., 178 (2016), p. 21-29.

TESTEZLAF, R. **Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática**. Engenharia Agrícola, 2008, 28(3), p. 604 a 613.

TESTEZLAF, R. **Irrigação: Métodos, Sistemas e Aplicações**. UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2017.

TESTEZLAF, R.; de DEUS, F. P.; MESQUITA, M. **Filtros de areia na irrigação localizada**. UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2014.

TIMOL PRODUTOS MAGNÉTICOS. 2015. Disponível em <<https://www.omagnetizadordeagua.com.br/copia-top-4-2>>. Acesso em 04 de junho de 2020.

TOLEDO E. J. L.; RAMALHO T. C.; MAGRIOTIS Z. M. **Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: Insights from experimental and theoretical models**. Journal of Molecular Structure, 888 (2008) 409–415.

WALLER, P.; YITAYEW, M. **Irrigation and Drainage Engineering**. Springer, 2016. E-Book. ISBN 978-3-319-05699-9. Disponível em: <<https://www.springer.com/gp>>.

WANG, Y.; WEI, H.; LI, Z. **Effect of magnetic field on the physical properties of water**. Results in Physics, volume 8, 2018, p. 262-267.

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

XIAOFENG P.; BO, D. **Investigation of changes in properties of water under the action of a magnetic field**. Sci. China Ser. G Phys. Mech. Astron., 51 (2008), p. 1621-1632.

Yusuf, K.O. & Ogunlela, A.O. (2017). **Effects of magnetized water on the vegetative growth and yield of tomato**. Agricultural Engineering International: CIGR Journal. 19. 1-8.

ZHOU, K.X.; LU, G.W.; ZHOU, Q.C.; SONG, J.H.; JIANG, S.T.; XIA, H.R. **Monte Carlo simulation of liquid water in a magnetic field**. J. Appl. Phys., v.88, p.1802-1805, 2000.