



II CONPESQ
**Congresso de Pesquisa,
Pós-Graduação e Inovação**

Os novos rumos da ciência pós-pandemia

12 a 16 de abril de 2021 Universidade Federal do Cariri - UFCA

**INFLUÊNCIA DO TEMPO DE OPERAÇÃO DE FILTRO
LENTO DE AREIA SOBRE A PERDA DE CARGA E
GRADIENTE HIDRÁULICO AO LONGO DO LEITO
FILTRANTE**

Antônio Ilderlânio de Sousa Leite¹

Egresso do curso de Engenharia Civil da UFCA
ilderlanio.leite@aluno.ufca.edu.br

Antônio Moreira Rolim Júnior²

Discente do curso de Engenharia Civil da UFCA
antoniomoreira018@gmail.com

Maria Gorethe de Sousa Lima Brito³

Servidora Docente da UFCA
gorethe.lima@ufca.edu.br

Lucimara Alves Bandeira⁴

Servidora da UFCA
lucimara.bandeira@ufca.edu.br

RESUMO: O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do tempo de operação do filtro lento de areia em escala piloto, com regime intermitente de escoamento, sobre o comportamento da perda de carga e do gradiente hidráulico de pressão ao longo do leito filtrante. Para tal, foi construído um filtro lento piloto composto de camada de areia fina e base de brita, saídas laterais para coleta de amostras e piezômetro, submetido a carreiras de filtração com fluxo descendente de $5,2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, utilizando diluições de água bruta de manancial superficial e, avaliado periodicamente a perda de carga e o gradiente hidráulico de pressão ao longo do meio filtrante, durante o período estudado. Após 93 dias de operação, foram registradas perdas de carga máxima na ordem de 4,2 cm no 91º dia, incremento considerável em relação à menor perda de carga final registrada de 1,3cm; o aumento da perda de carga foi mais pronunciado nos primeiros 10 cm da camada de areia, chegando a representar 36% da

-
- 1 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.
 - 2 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.
 - 3 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.
 - 4 Será preenchido pela Comissão após avaliação com as informações dos metadados da submissão.

perda de carga total. O gradiente hidráulico apresentou maior relevância no ponto P2 (10cm de profundidade), sendo registrado o valor máximo de 0,15 cm/cm no 93º dia de operação. Quando os dados são analisados em grupos, percebe-se aumento significativo de perda de carga e gradiente hidráulico nos últimos 31 dias de operação do filtro lento, constatando o acúmulo de partículas no topo do leito filtrante ao longo do tempo de operação como fator preponderante na alteração dos parâmetros hidrodinâmicos analisados.

PALAVRAS-CHAVE: Filtro Lento de Areia; Perda de Carga; Gradiente Hidráulico

ABSTRACT: The objective of this paper is to evaluate the influence of the operating time of the slow sand filter on a pilot scale, with intermittent flow regime, on the behavior of the head loss and the hydrostatic pressure gradient along the filter bed. For this purpose, a slow pilot filter was built composed of a layer of fine sand and gravel base, side outlets for sample collection and piezometer, submitted to filtration rows with a downward flow of 5,2 m³/m².day, using dilutions of raw surface water and, periodically evaluated the pressure loss and the hydraulic pressure gradient along the filtering bed, during the studied period. After 93 days of operation, maximum head losses were recorded in the order of 4,2 cm on the 91st day, a considerable increase in relation to the lowest recorded head loss of 1,3 cm; the increase in pressure loss was more pronounced in the first 10 cm of the sand layer, reaching 36% of the total pressure loss. The hydraulic gradient showed greater relevance at point P2 (10 cm deep), with a maximum value of 0,15 cm/cm being recorded on the 93rd day of operation. When analyzed in groups, a significant increase in head loss and hydrostatic gradient is perceived in the last 31 days of operation of the slow filter, confirming the accumulation of particles at the top of the filter bed over the time of operation as a major factor in changing hydrodynamics parameters analyzed.

Keywords: Slow Sand filter; Head Loss; Hydrostatic Gradient.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem sido exigido o uso de soluções sustentáveis para o tratamento de águas superficiais, que adequem suas características para o consumo humano de forma econômica e segura (FREITAS, 2017). Assim, para Murtha e Heller (2003), o uso de filtros lentos tem se tornado uma solução cada vez mais interessante, principalmente em comunidades rurais e de pequeno porte de países em desenvolvimento. São atribuídas a esta técnica características como facilidade operacional, baixos custos de implantação e operação e grande eficiência na remoção de sólidos e organismos patogênicos.

A filtração consiste na passagem da água por entre um meio poroso, melhorando sua qualidade através da remoção de partículas suspensas e coloidais; da redução do número de bactérias e de outros organismos; da modificação de alguns constituintes químicos e da oxidação da matéria orgânica (HUISMAN, 1982).

A perda de carga no leito filtrante é um dos mais importantes parâmetros de projeto e operação dos filtros lentos, sendo definido como a perda na energia total presente num fluido escoando (NOGUEIRA *et al.* 2020). A ocorrência da perda de carga se deve a alguns elementos que interferem no deslocamento do líquido, como: a distância percorrida pelo

líquido, a velocidade de escoamento, a turbulência do fluido e a viscosidade do líquido (FONSECA, 2019).

Conforme Murtha (1998), devido às baixas velocidades predominantes na filtração lenta, a perda de carga é mais pronunciada na superfície do leito filtrante, resultante da colmatação. Esse fenômeno decorre da redução da área transversal dos espaços vazios de um determinado meio poroso, afetando a capacidade drenante do meio, e ocorre ao longo do tempo, a qual pode ocorrer em diferentes formas: colmatação física, química e biológica (REMÍGIO, 2006).

Durante o ciclo da filtração, as partículas em suspensão e coloidais na água adentram nos poros do leito e aderem ao leito filtrante. À medida que há acúmulo de material, diminui o volume de vazios, conseqüentemente aumentando a velocidade intersticial e, assim, a perda de carga. A ação das forças de viscosidade, pelo aumento da velocidade intersticial, remove da superfície dos grãos parte do material depositado, o qual pode ser interceptado nas camadas mais profundas do leito ou transpassar para o efluente, aumentando sua turbidez. Assim, o final de uma carreira de filtração e o momento ideal para sua limpeza são determinados ou pelo alcance de uma perda de carga máxima permissível pela hidráulica do sistema (altura de lâmina d'água do sobrenadante) ou pela elevação da turbidez no efluente do filtro acima de um valor permitido (RICHTER, 2009).

O equacionamento da perda de carga é efetuado a partir das formulações de Darcy para escoamento em meios porosos. A lei de Darcy (Equação 01) enuncia que o gradiente hidráulico (i) é proporcional à velocidade ou taxa de escoamento superficial (q) em m^3/s e inversamente proporcional à permeabilidade (K) do meio (MURTHA, 1998).

$$q = K \cdot i \cdot A \quad i = \frac{\Delta H}{L}$$

(Equação 1)

Onde:

ΔH = perda de carga (m)

L = comprimento (m)

A = área da seção transversal perpendicular ao fluxo (m^2)

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de um filtro lento de areia com turbidez em torno de 50 UNT (± 10 UNT), considerada a máxima tolerável para filtros lentos, com escoamento intermitente, em função dos parâmetros hidrodinâmicos (perda de carga e gradiente hidráulico). Esta pesquisa deseja contribuir com a melhoria desta

tecnologia de tratamento de água, dado que a existência de estudos com bons resultados nessa área é um motivador à preservação e disseminação dessa tecnologia, principalmente em área rural, onde mão de obra qualificada ou recursos são escassos (DE SOUZA et al, 2017).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do tempo de operação do filtro lento de areia em escala piloto, com regime intermitente de escoamento, sobre o comportamento da perda de carga e do gradiente hidráulico ao longo do meio filtrante.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

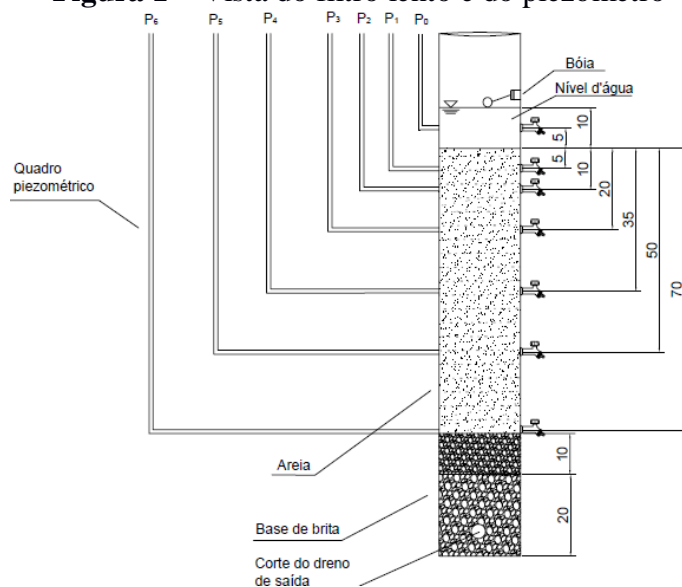
- Submeter o filtro a carreiras de filtração com fluxo descendente com água bruta de manancial superficial, com valor de turbidez de 50 UNT (± 10 UNT) e a uma taxa de filtração de $5,2 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$.
- Avaliar periodicamente os parâmetros hidrodinâmicos do filtro, através do monitoramento de perda de carga e do gradiente hidráulico ao longo do meio filtrante durante 93 dias de operação.
- Avaliar estatisticamente os dados obtidos, de forma a entender os fenômenos existentes no filtro lento de areia.

3 METODOLOGIA

O filtro lento piloto é constituído de tubo de PVC rígido, de diâmetro de 20cm, CAP de 20cm, dreno de saída, boia, reservatório de água, manta geotêxtil não-tecida, torneiras, quadro piezômetro, leito de areia fina e base de brita, conforme ilustra a Figura 1.

Na lateral do filtro foi instalado o piezômetro, composto por seis dutos de plástico transparentes distribuídos ao longo do meio filtrante (5, 10, 20, 35, 50 e 70 cm), com a finalidade de registrar a perda de carga em pontos específicos do leito, e um duto na altura de 5cm acima do topo da camada de areia para registrar o nível do sobrenadante. Cada uma dessas alturas foi identificada com uma sigla: o ponto P0 corresponde ao sobrenadante (pressão inicial), os pontos P1 até P6 correspondem às alturas das torneiras na sequência já descrita. A saída da água tratada foi denominada P7, funcionando também como registro para controle de vazão. Para controle do nível de água sobrenadante, foi utilizada uma boia.

Figura 1 – Vista do filtro lento e do piezômetro



Fonte: O autor

O sistema de drenagem, localizado na parte inferior do filtro, foi constituído por um tubo de PVC de 20 mm de diâmetro, perfurado a cada 1 cm, com diâmetro dos furos de 4 mm. O sistema de alimentação consiste em um balde apoiado num nível acima da entrada no filtro, funcionando por gravidade. Para evitar o arraste do meio filtrante, quando do uso das torneiras laterais e do piezômetro, revestiu-se internamente o filtro com uma manta drenante (geotêxtil não-tecido). O filtro foi instalado nas dependências da Universidade Federal do Cariri – *Campus* Juazeiro do Norte - Ce, na lateral externa do Laboratório de Saneamento.

O interior do filtro é composto de uma camada de areia fina lavada de 70 cm de espessura, que funciona como meio filtrante, com características explicitadas na Tabela 1. A base do filtro é constituída por duas camadas de brita, cada uma com 20cm de espessura, sendo a primeira com o diâmetro da brita variando entre 0,29 a 0,35 mm e a segunda entre 0,25 a 0,29 mm, como mostra a Figura 1.

Tabela 1 – Características do meio filtrante

Diâmetro efetivo (mm)	0,16
Coefficiente de uniformidade	2,3
Porosidade (%)	45,0
Porcentagem de finos (%)	< 2,0

Fonte: O autor

O filtro foi operado de forma intermitente, ou seja, o filtro foi alimentado uma vez ao dia e permaneceu funcionando em média três horas, de forma a garantir o tempo de

detenção hidráulica de 1 hora e 20 minutos, a uma taxa de 5,2 m³/m².dia (6,8 L/h). Uma lâmina d'água de 10 cm foi mantida acima do leito filtrante durante o período de funcionamento. No restante do dia, a lâmina d'água era reduzida para 5 cm, objetivando facilitar a reaeração da lâmina d'água nos períodos de intermitência do filtro, criando condições ambientais adequadas para a manutenção da microbiota no interior do mesmo.

A água bruta foi captada na lagoa da APUC, localizada no município de Juazeiro do Norte – Ceará, e trazida para o Laboratório de Saneamento para adequação do valor da turbidez e oxigenação da água (turbidez de 50 UNT ± 10 UNT e oxigênio dissolvido de 7,14 mg/L ± 1,36mg/L). A turbidez de 50 UNT é a máxima recomendado por Hespanhol (1987) para filtros lentos. Para garantir a presença de microrganismos, a cada 10 litros de diluição de água bruta, eram inseridos 10 ml de esgoto bruto, previamente filtrado para remoção de sólidos maiores. Após esta etapa, a água a ser tratada era conduzida até o reservatório de alimentação para iniciar o processo.

A água do sobrenadante (ponto P0) e do efluente tratado possui características físico-químicas descritas nas tabelas abaixo (dados totais e divididos em grupos de igual período); a Tabela 2 descreve a média dos parâmetros físicos e a Tabela 3 ilustra a média dos parâmetros químicos monitorados.

Tabela 2 – Características físicas da água de estudo

	Turbidez (UNT)			Cor aparente (uC)			Temperatura (°C)
	Entrada	Saída	Eficiência (%)	Entrada	Saída	Eficiência (%)	
Total	47.6	12.7	73.4	101.1	31.7	68.6	28
1° grupo	49.5	17.5	64.6	107.7	41.7	61.2	26.3
2° grupo	45.6	10	78.1	88	27.9	68.3	27.8
3° grupo	47.2	9.1	80.7	100.9	24.6	75.7	30.1

Fonte: O autor

Tabela 3 – Características químicas da água de estudo

	Ferro (mg/L)			Manganês (mg/L)		
	Entrada	Saída	Eficiência (%)	Entrada	Saída	Eficiência (%)
Total	1.07	0.15	86.5	1.28	0.23	82.1
1° grupo	1.07	0.14	86.6	1.33	0.26	80.4
2° grupo	1.01	0.14	86.4	0.94	0.08	91.1
3° grupo	1.1	0.17	84.3	1.31	0.25	81

Fonte: O autor

A Tabela 4 descreve os parâmetros hidrodinâmicos analisados. As leituras das perdas de carga foram realizadas no final de cada dia de operação, sempre considerando a altura registrada em P_0 . Os dados foram analisados (em conjunto e em seguida divididos em três grupos), e tabulados em planilha eletrônica para processamento dos resultados tendo sido utilizados o programa BioStatic 5.0 para os cálculos de estatística descritiva e teste de variância e o Minitab 19 para criação dos gráficos.

Tabela 4 – Parâmetros analisados e seu método de avaliação

Parâmetros	Método de Avaliação	Unidade de Medida
Perda de carga	Piezométrico	cm
Gradiente hidráulico	Lei de Darcy	cm/cm

Fonte: O autor

Durante a realização dos experimentos, as vazões foram aferidas a cada meia hora como forma de controle da taxa de filtração. O sistema foi alimentado de forma intermitente (3 horas de alimentação e 21 horas de repouso) durante 93 dias, sendo que a perda de carga foi monitorada em 43 dias. O volume final de água tratada foi de aproximadamente 1.900 litros.

4 RESULTADOS

Ao se avaliar as vazões efluentes ao filtro, não foram registradas mudanças consideráveis durante a quase totalidade da operação do filtro. Porém, nos três últimos dias registrados foi possível perceber uma considerável redução na taxa de filtração, chegando até o valor de $2,6 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{dia}$, metade da preestabelecida em até uma hora após o controle inicial da vazão, aumento do tempo de detenção hidráulica para 2 horas e 40 minutos. Nessa situação, foi possível o restabelecimento da taxa de filtração utilizada durante o experimento através da abertura gradual do registro.

Para o melhor entendimento do comportamento da perda de carga e do gradiente hidráulico ao longo do período de operação do filtro, os dados foram analisados em conjunto, e posteriormente foram divididos em três grupos, de forma que cada grupo corresponda ao mesmo tempo de operação em número de dias (31 dias cada grupo). O 1º grupo (1º ao 31º dia) possui resultados de 16 dias de monitoramento, já o 2º grupo (32º ao 62º dia) possui resultados em 12 dias e o 3º grupo (até o 93º dia) possui 15 dias com dados monitorados.

Na Tabela 5 encontram-se os resultados da análise descritiva dos dados obtidos de perda de carga ao longo do meio filtrante durante toda a operação do filtro lento.

Tabela 5 – Estatística descritiva dos resultados de perda de carga

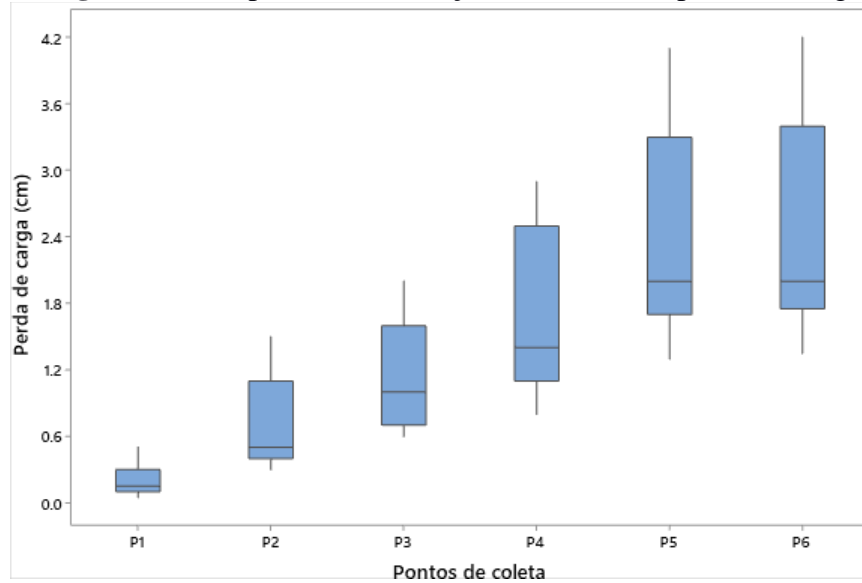
Perda de carga (cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,05	0,30	0,60	0,80	1,30	1,35
Máximo	0,50	1,50	2,00	2,90	4,10	4,20
Amplitude Total	0,45	1,20	1,40	2,10	2,80	2,85
Mediana	0,15	0,50	1,00	1,40	2,00	2,00
Média Aritmética	0,21	0,71	1,14	1,69	2,41	2,48
Coefficiente de Variação (%)	59,0	56,0	42,8	40,9	36,8	36,5

Fonte: O autor

É possível observar expressiva amplitude dos valores de perda de carga nos pontos monitorados, aumentando ao longo do meio filtrante até o ponto P5, vindo a estabilizar no ponto P6. O coeficiente de variação decresce ao longo do leito filtrante, evidenciando uma tendência de melhor distribuição dos dados entorno da média, contudo sem estar abaixo de 30%, valor considerado máximo para uma distribuição normal de dados entorno da média (PIMENTEL-GOMES, 1985).

A Figura 2 evidencia a distribuição dos dados em cada ponto, sendo possível perceber uma maior amplitude de dados nos 3º e 4º quartil de cada ponto. Isso se deve ao fato de que há um aumento dos valores de perda de carga ao longo do tempo de operação do filtro lento; porém essa distribuição de dados não aparenta ter relação linear com o tempo, como mostra a Figura 3. É possível perceber proximidade nos resultados de perda de carga dos 1º, 31º e 62º dia de operação, contudo há um salto nos valores observados no 93º dia. Este aumento é mais pronunciado nos primeiros 10 cm da camada de areia, chegando a representar 36% da perda de carga total, devido ao fato de que, na filtração lenta, o processo de coagem tem papel fundamental na retenção das partículas maiores, que ficam retidas nos primeiros centímetros da areia.

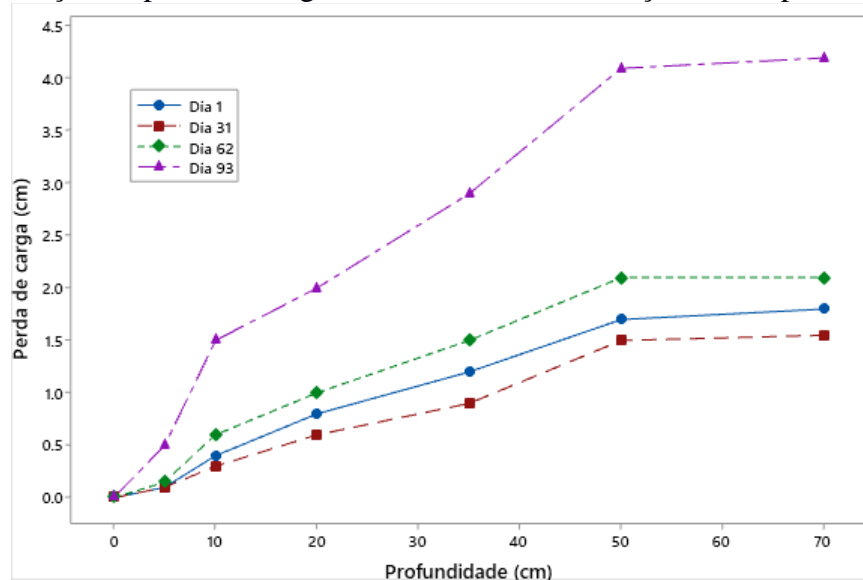
Figura 2 – Boxplot da distribuição dos dados de perda de carga



Fonte: O autor

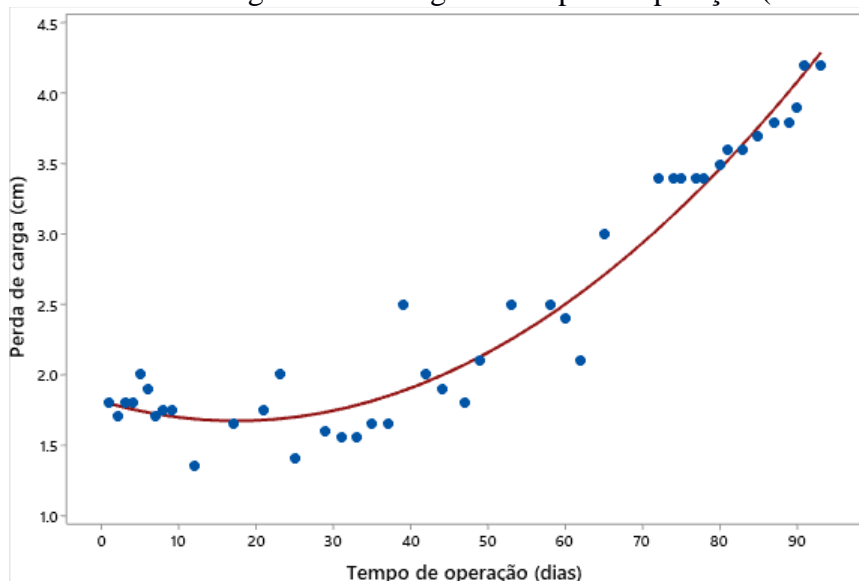
Ao se analisar os resultados da perda final (ponto P6) contidos na Figura 4, nota-se um comportamento quadrático dos dados, apresentando tendência de aumento na perda de carga final à medida que o tempo de operação aumenta ($R^2 = 0.9392$), sendo mais pronunciada a partir do 70° dia, chegando a 4,2 cm no 91° dia de operação.

Figura 3 – Evolução da perda de carga no leito filtrante em função do tempo de operação



Fonte: O autor

Figura 4 - Perda de carga final ao longo do tempo de operação ($R^2 = 0.9392$)



Fonte: O autor

A partir dos valores de perda de carga obtidos pela leitura no piezômetro e com as distâncias entre os pontos monitorados, foi possível obter os valores de gradiente hidráulico, resumidamente descritos na Tabela 6. Os primeiros 10 cm do leito filtrante (até P2) apresentam as maiores amplitudes e coeficientes de variação, contudo os coeficientes de variação obtidos são praticamente idênticos aos dos resultados de perda de carga e as amplitudes variam consideravelmente nos primeiros 20 cm de leito. A Figura 5 destaca a distribuição dos dados em cada ponto, sendo possível perceber uma maior amplitude de dados nos 3° e 4° quartis de cada ponto, principalmente no ponto P2.

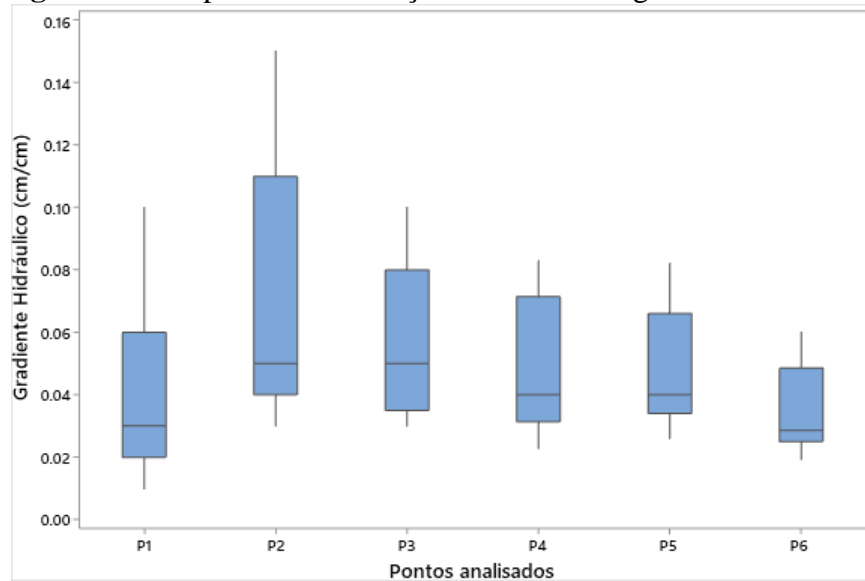
É possível observar que, diferente dos valores de perda de carga, o comportamento do gradiente hidráulico aumenta de maneira expressiva até os 10cm (ponto P2), vindo a cair e se estabilizar no restante do leito. Como ilustra a Figura 6, os últimos 31 dias de operação apresentaram relevante aumento deste parâmetro, em comparação com o 62° dia.

Tabela 6 – Estatística descritiva dos resultados de perda de carga

Gradiente Hidráulico (cm/cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,01	0,03	0,03	0,023	0,026	0,019
Máximo	0,1	0,15	0,1	0,083	0,082	0,06
Amplitude Total	0,09	0,12	0,07	0,06	0,056	0,041
Mediana	0,03	0,05	0,05	0,04	0,04	0,029
Média Aritmética	0,042	0,071	0,057	0,048	0,048	0,036
Coefficiente de Variação (%)	59,0	56,3	42,7	40,8	36,8	36,4

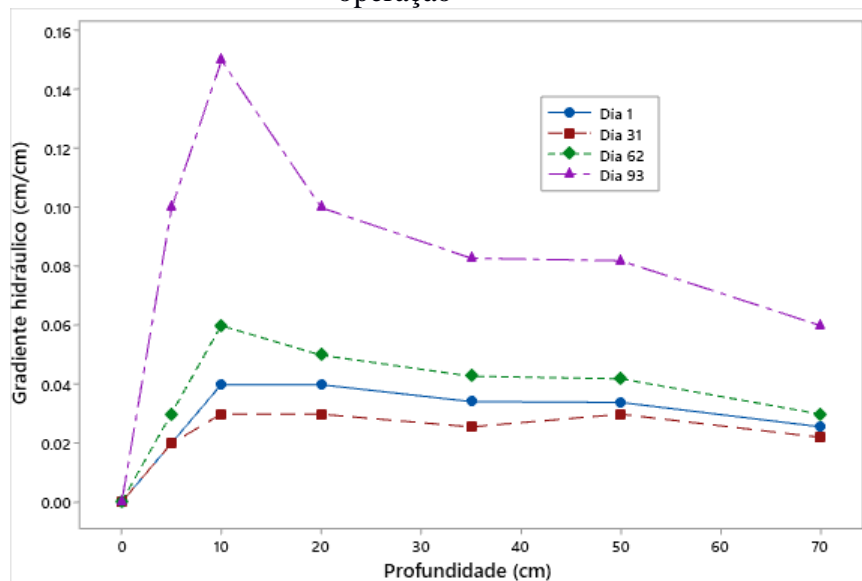
Fonte: O autor

Figura 5 – Boxplot da distribuição dos dados do gradiente hidráulico



Fonte: O autor

Figura 6 – Evolução do gradiente hidráulico no leito filtrante em função do tempo de operação



Fonte: O autor

4.1 1° GRUPO

Analisando os dados descritos na Tabela 7, constata-se que 83,3% dos pontos analisados na 1° fase da operação do filtro apresentaram coeficiente de variação abaixo de 30%, evidenciando uma distribuição dos valores de perda de carga mais uniforme entorno

da média e ao longo do leito filtrante.

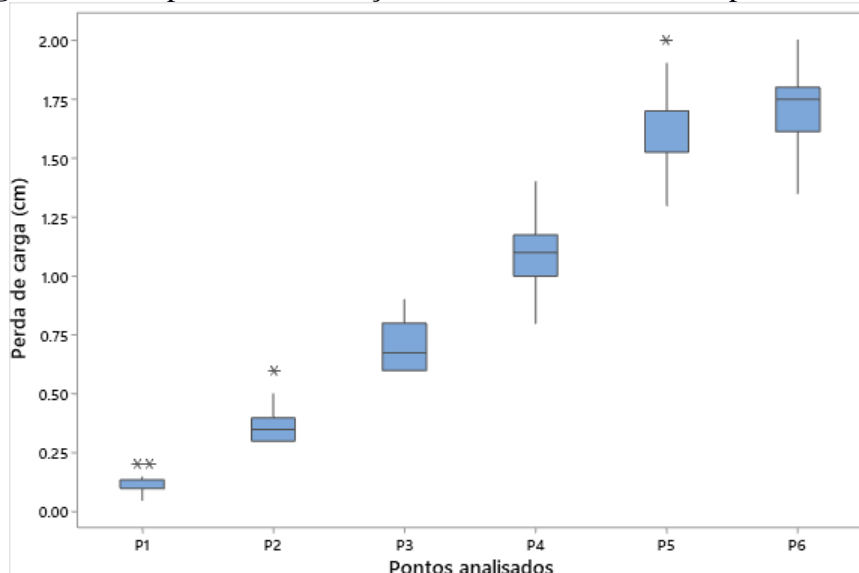
Mesmo com baixo coeficiente de variação, como apresenta a Figura 7, a distribuição dos resultados apresenta alguns *outliers*, ou pontos extremos, nos pontos P1, P2 e P5 e as medianas coincidindo com os limites dos 1º ou 3º quartis nos pontos P1 e P5, demonstrando certa instabilidade na distribuição dos dados obtidos durante o período inicial na operação do filtro lento. Como já constatado anteriormente na figura 4, até o 31º dia não é possível observar clara tendência no aumento da perda de carga.

Tabela 7 - Estatística descritiva do 1º grupo de dados da perda de carga

Perda de carga (cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,05	0,30	0,60	0,80	1,30	1,35
Máximo	0,20	0,60	0,90	1,40	2,00	2,00
Amplitude Total	0,15	0,30	0,30	0,60	0,70	0,65
Mediana	0,10	0,35	0,67	1,10	1,70	1,75
Média Aritmética	0,11	0,37	0,72	1,08	1,64	1,72
Coefficiente de Variação (%)	38,0	24,0	17,2	15,2	11,3	10,6

Fonte: O autor

Figura 7 – Boxplot da distribuição dos dados da 1º fase da perda de carga



Fonte: O autor

Analisando os resultados de gradiente hidráulico, é possível perceber que as maiores amplitudes estão relacionadas com os primeiros pontos amostrais, vindo a reduzir ao longo do meio filtrante. A Figura 8 apresenta a distribuição dos dados em cada ponto, destacando-

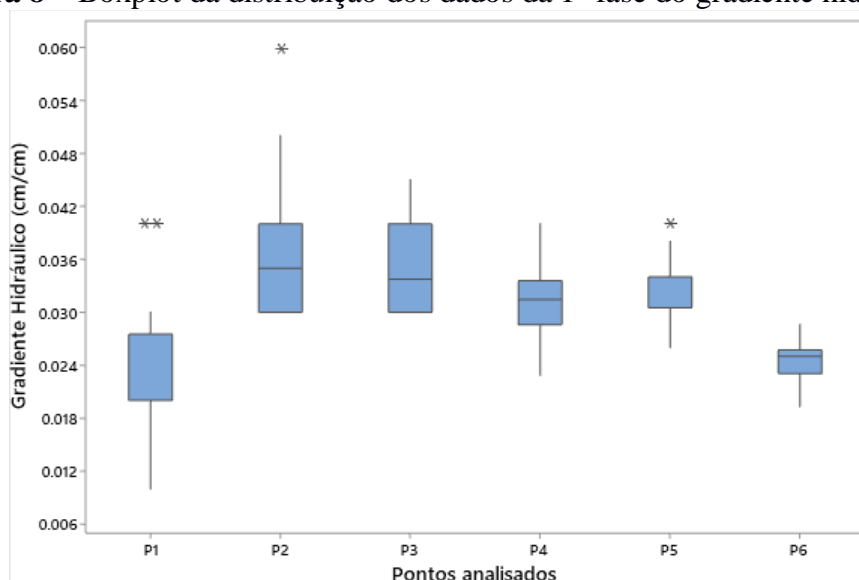
se a variação mais significativa de resultados entre os pontos P1 e P2.

Tabela 8 - Estatística descritiva da 1ª fase do gradiente hidráulico

Gradiente hidráulico (cm/cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,01	0,03	0,03	0,023	0,026	0,019
Máximo	0,04	0,06	0,045	0,04	0,04	0,029
Amplitude Total	0,03	0,03	0,015	0,017	0,014	0,01
Mediana	0,02	0,035	0,034	0,031	0,034	0,025
Média Aritmética	0,023	0,037	0,036	0,031	0,033	0,025
Coefficiente de Variação (%)	38,1	24,0	17,2	14,7	11,3	11,2

Fonte: O autor

Figura 8 – Boxplot da distribuição dos dados da 1ª fase do gradiente hidráulico



Fonte: O autor

4.2 2º GRUPO

Analisando o 2º grupo do experimento, é possível perceber aumento nos valores de coeficiente de variação (Tabela 9), quando comparado com os resultados da primeira fase, entre os pontos P2 a P6; apenas o ponto P1 apresentou coeficiente de variação menor do que a fase anterior. A amplitude aumenta em função da profundidade, com dados mais dispersos nos 2º e 3º quartis, principalmente nos pontos P5 e P6, conforme a Figura 9.

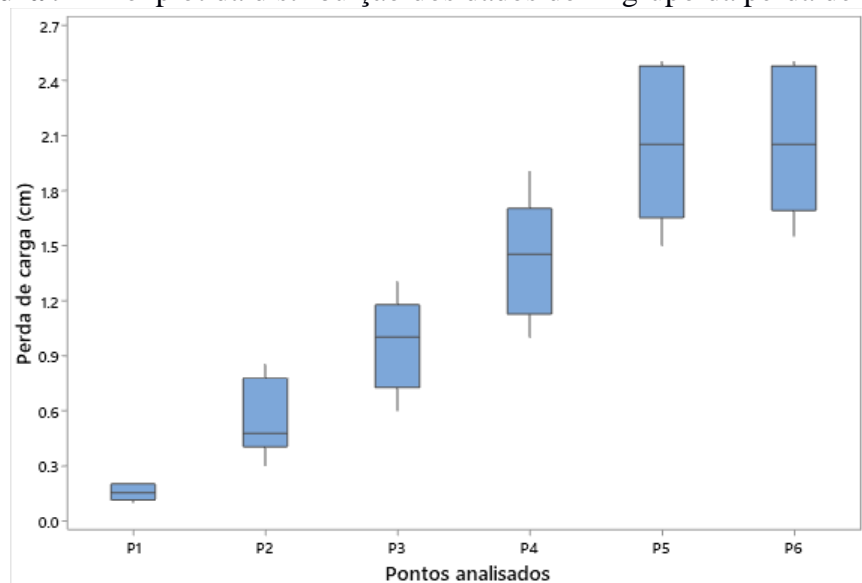
Quando comparados os resultados de perda de carga em cada ponto entre a primeira e segunda fase do experimento, não foi possível observar diferença significativa (teste de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$) em nenhum dos pontos.

Tabela 9 - Estatística descritiva do 2º grupo de dados da perda de carga

Perda de carga (cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,1	0,3	0,6	1,0	1,5	1,55
Máximo	0,2	0,85	1,3	1,9	2,5	2,5
Amplitude Total	0,1	0,55	0,7	0,9	1,0	0,95
Mediana	0,15	0,475	1,0	1,45	2,05	2,05
Média Aritmética	0,15	0,55	0,95	1,43	2,04	2,05
Coefficiente de Variação (%)	25,7	36,3	26,3	22,4	18,2	17,3

Fonte: O autor

Figura 9 – Boxplot da distribuição dos dados do 2º grupo da perda de carga



Fonte: O autor

Já para os resultados observados de gradiente hidráulico (Tabela 10), a amplitude dos dados aumentou entre os pontos P2 a P6, em comparação com o grupo anterior. No ponto P1 houve uma pequena redução da amplitude, dado que não houve aumento no valor máximo neste ponto. Conforme ilustra a Figura 10, o ponto P2 apresentou maior amplitude, com dados bastante dispersos no 3º quartil.

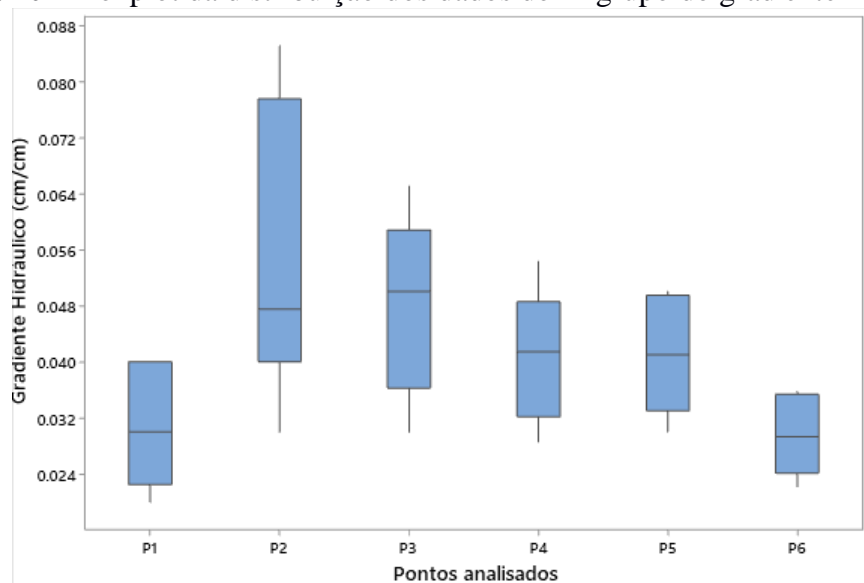
Assim como a perda de carga, não foi possível observar diferença significativa (teste de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$) em nenhum dos pontos quando comparados os resultados entre a primeira e segunda fase do experimento.

Tabela 10 - Estatística descritiva do 2º grupo de dados do gradiente hidráulico

Gradiente hidráulico (cm/cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,02	0,03	0,03	0,029	0,03	0,022
Máximo	0,04	0,085	0,065	0,054	0,05	0,036
Amplitude Total	0,02	0,055	0,035	0,025	0,02	0,014
Mediana	0,03	0,048	0,050	0,042	0,041	0,03
Média Aritmética	0,031	0,055	0,048	0,041	0,041	0,03
Coefficiente de Variação (%)	25,7	36,3	26,4	22,4	18,3	17,2

Fonte: O autor

Figura 10 – Boxplot da distribuição dos dados do 2º grupo do gradiente hidráulico



Fonte: O autor

4.3 3º GRUPO

Para os resultados da 3ª fase (Tabela 11), é possível perceber aumento expressivo nos valores mínimo e máximo das perdas de carga, bem como há importante crescimento nas amplitudes em comparação com o 1º grupo.

Nos últimos 31 dias de operação do filtro foram registrados os menores coeficientes de variação, todos abaixo de 30%, demonstrando tendência de homogeneidade dos dados em relação à média; a partir do ponto P3 (20cm de profundidade) foram registrados coeficientes de variação abaixo de 10% e se mantiveram praticamente constantes ao longo dos 50cm restantes de leito. Na Figura 11 é possível perceber uma melhor distribuição dos dados entre os quartis e em função da profundidade.

Aplicando o teste de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$) como forma de comparar os pontos amostrais entre os grupos, foi possível constatar diferença significativa do 3º grupo com os

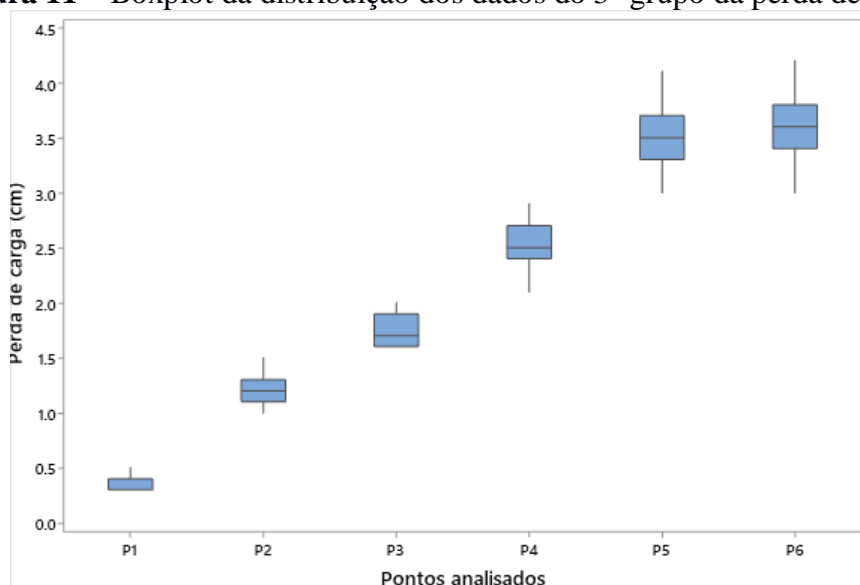
1° e 2° grupos de dados.

Tabela 11 - Estatística descritiva do 3° grupo de dados da perda de carga

Perda de carga (cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,3	1,0	1,6	2,1	3,0	3,0
Máximo	0,5	1,5	2,0	2,9	4,1	4,2
Amplitude Total	0,2	0,5	0,4	0,8	1,1	1,2
Mediana	0,3	1,2	1,7	2,5	3,5	3,6
Média Aritmética	0,36	1,21	1,74	2,55	3,53	3,62
Coeficiente de Variação (%)	20,4	12,0	8,6	7,9	8,3	8,9

Fonte: O autor

Figura 11 – Boxplot da distribuição dos dados do 3° grupo da perda de carga



Fonte: O autor

Quando analisados os dados de gradiente hidráulico do 3° grupo de dados (Tabela 12), percebe-se aumento expressivo nos valores do parâmetro analisado, em comparação com os grupos amostrais anteriores, fato este validado pela diferença significativa (teste de Kruskal-Wallis, $\alpha = 0,05$) encontrada.

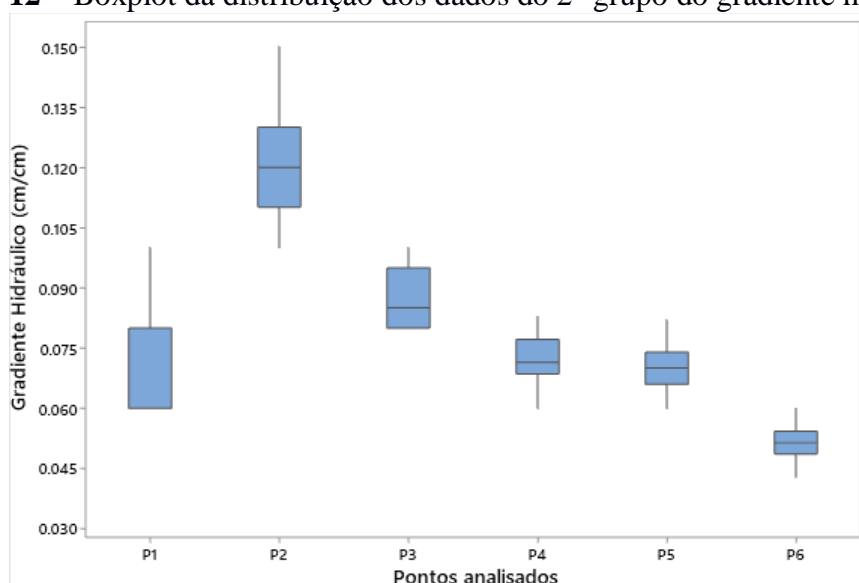
Conforme ilustra a Figura 12, apenas o ponto P1 possui concentração de dados no 3° e 4° quartis, o restante dos pontos possui dados melhor distribuídos entorno da média, fato este validado pelos valores de coeficiente de variação encontrados, que decrescem até P3 e depois se estabilizam.

Tabela 12 - Estatística descritiva da 1ª fase do gradiente hidráulico

Gradiente hidráulico (cm/cm)	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Mínimo	0,06	0,1	0,08	0,06	0,06	0,043
Máximo	0,1	0,15	0,1	0,083	0,082	0,06
Amplitude Total	0,04	0,05	0,02	0,023	0,022	0,017
Mediana	0,06	0,12	0,085	0,071	0,07	0,051
Média Aritmética	0,072	0,121	0,087	0,073	0,071	0,052
Coefficiente de Variação (%)	20,5	12,0	8,6	7,9	8,3	8,7

Fonte: O autor

Figura 12 – Boxplot da distribuição dos dados do 2º grupo do gradiente hidráulico



Fonte: O autor

5 CONCLUSÃO

Através da análise estatística da perda de carga, observando os resultados completos e divididos em grupos, é perceptível a expressiva redução na variabilidade da perda de carga ao longo do leito filtrante e em função do tempo de operação, com destaque para os primeiros 10cm de areia, que apresentam os maiores coeficientes de variação e correspondem a 36% da perda de carga total registrada no fim da carreira de filtração. Foi no topo do leito filtrante onde ocorreram os processos mais relevantes de purificação da água, como a sedimentação, coagem e adsorção biológica. O acúmulo de partículas suspensas e coloidais, bem como a precipitação de íons metálicos e o desenvolvimento de biofilme ao redor dos grãos das camadas mais superficiais de areia colaboraram com o aumento da perda de carga ao longo dos dias em que o filtro lento foi alimentado. Esse aumento mostrou-se mais expressivo e

com clara tendência de crescimento no 3º grupo de dados, correspondente aos últimos 31 dias de operação, com perda de carga máxima de 4,2cm atingida no 91º dia de operação, incremento considerável em relação à menor perda de carga final registrada de 1,3cm.

O filtro foi capaz de operar a uma taxa controlável durante todo o período monitorado, tendo dificuldades em manter a vazão constante apenas nos últimos dias da operação do sistema, fato contornado pela abertura gradual do registro de saída. Considerando que a perda de carga máxima para que o sistema se torne inoperante é de 10cm (altura do sobrenadante), é possível atestar um desempenho satisfatório do filtro em termos de perda de carga máxima alcançada dentro do período estudado, e conseqüentemente, em fornecimento de água tratada conforme predeterminado pela taxa de filtração.

Quando avaliado o gradiente hidráulico, no primeiro grupo de dados, percebe-se razoável aumento dos valores entre P1 e P2, seguido de decréscimo em P3, e estabilização nos 50cm restantes do leito filtrante; contudo, ao longo da operação, observou-se expressivo aumento nos resultados em todos os pontos analisados, em especial o ponto P2 (10cm de profundidade), que apresentou os maiores valores de gradiente hidráulico durante todo o período de operação do filtro (0,15 cm/cm no 93º dia de operação), ganhando especial incremento no 3º grupo de dados (63º ao 93º dia de operação). A diferença entre os resultados do gradiente hidráulico, quando analisados em grupos, mostrou-se estatisticamente significativa apenas quando comparado o terceiro grupo com os dois grupos anteriores, demonstrando que a evolução do gradiente se deu ao longo do tempo, porém não apresenta tendência clara de linearidade.

A perda de carga é comumente utilizada como indicador da colmatação de um meio poroso, parâmetro este dependente de muitos fatores, como a qualidade da água bruta, vazão de água a ser tratada e as características do meio filtrante (granulometria, porosidade, coeficiente de uniformidade, etc.). O monitoramento das perdas de carga ao longo do meio filtrante, associado à relação com a distância entre os pontos analisados (gradiente hidráulico de pressão), possibilitou conhecer fenômenos de variação de pressão no leito filtrante, permitindo identificar o topo do leito (10cm de profundidade) como região de maior acumulação de partículas suspensas e coloidais, e, portanto, mais suscetível ao arraste de partículas e posterior comprometimento a qualidade da água.

Como sugestão para continuidade e aprimoramento da pesquisa, sugere-se utilização de modelos matemáticos mais expressivos para entendimento dos fenômenos hidrodinâmicos numa escala menor, maior investigação estatística dos dados obtidos e sua correlação com a qualidade da água ao longo do leito filtrante.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de iniciação científica e à Pró-reitoria de Pesquisa, Pós-graduação e Inovação (PRPI) pela concessão de auxílio para aquisição de insumos.

REFERÊNCIAS

DE SOUZA, Fernando Hymnô; *et al.* Diagnóstico e discussão sobre o uso da filtração lenta para abastecimento público em Santa Catarina, Brasil. **Revista DAE**, vol. 66, n° 209, jan/mar 2017, p. 37-50. Disponível em: https://www.google.com/url?q=http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_209_n_1698.pdf&sa=D&source=editors&ust=1614553912401000&usg=AOvVaw2mCS8c8FkO9U-mE3CnSJEY. Acesso em 25/01/21

FONSECA, Mateus Maschio et al. Estudo da perda de carga em tubulações nas redes de instalações hidráulicas. **CEP**, v. 95020, p. 371. Disponível em: <http://ojs.fsg.br/index.php/pesquisaextensao/article/view/4134>. Acesso em 12/01/21

FREITAS, Bárbara Luíza Souza. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017. Disponível em: <://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18102017-165857/publico/DissertFreitasBarbaraLuizaSCorrig.pdf>. Acesso em 13/11/20

HESPANHOL, Ivanildo. **Filtração lenta**. In: Azevedo Netto, J.M. (ed.) Técnicas de Abastecimento de Água, vol. 2. CETESB, São Paulo, 1987.

HUISMAN, L. Slow sand filtration. Research and Demonstration. Project on Slow Sand Filtration. **AIDIS Congress**, Panamá, 1982. 99p.

MURTHA, Ney Albert. **Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia**. Dissertação (Mestrado), Belo Horizonte: UFMG/EE, 1998. 227 p. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/615M.PDF>. Acesso em 13/11/20.

MURTHA, N. A.; HELLER, L. Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.8, n.4, p. 257-267, 2003.

NOGUEIRA, Vinicius Lopes *et al.* **Otimização topológica de perda de carga utilizando CFD**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2020. 89p. Disponível em:

http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/352959/1/Nogueira_ViniciusLopes_M.pdf. Acesso em 09/01/21

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de Estatística Experimental**. 12. ed. Piracicaba: Livraria Nobel, 1985. 467p.

REMÍGIO, Aline F. N. **Estudo de colmatção biológica de sistemas filtrodrenantes sintéticos de obras de disposição de resíduos domésticos urbanos sob condições anaeróbicas**. Tese (Doutorado). Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2006. 154p. Disponível em:
https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/6635/1/2006_Aline%20Fl%C3%A1via%20Nunes%20Rem%C3%ADgio.pdf. Acesso em 09/01/21

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.