



**Estudo da carreira de filtração de efluente industrial usando filtros
de areia para diferentes taxas de filtração em escala de bancada**

Hugo Garcia Dalio

Discente, Ufscar, Brasil
hugo.dalio@estudante.ufscar.br
ORCID: 0009-0009-3158-5391

Cali Laguna Achon

Professora Doutora, UFscar, Brasil
caliachon@ufscar.br
ORCID: 0000-0001-5819-8089



Estudo da carreira de filtração de efluente industrial usando filtros de areia para diferentes taxas de filtração em escala de bancada

RESUMO

Objetivo - O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o processo físico de filtração, usando filtros de areia em escala de bancada, para o tratamento de efluente industrial gerado no processo de CIP (*Clean in Place*) em indústria cervejeira.

Metodologia - Pesquisa experimental em escala de bancada com abordagem quantitativa. Aplicou-se o método científico experimental para avaliar filtros de areia no tratamento de efluentes de CIP da indústria cervejeira, com análises de cor, turbidez e pH segundo normas AWWA (2012).

Originalidade/relevância - O estudo aborda um *gap* teórico sobre o uso da filtração em areia para efluentes industriais específicos. Destaca-se pela proposta de tecnologia simples, de baixo custo e sustentável, alinhada aos ODS 6 e 12.

Resultados - A filtração promoveu reduções superiores a 50% em cor e turbidez, mantendo pH estável. A colmatação aumentou a eficiência de remoção, evidenciando o bom desempenho do sistema.

Contribuições teóricas/metodológicas - Aprofunda o entendimento da carreira de filtração e colmatação em meios granulares, apresentando modelo experimental reprodutível para dimensionamentos futuros.

Contribuições sociais e ambientais - Estimula o reúso de água e práticas sustentáveis na indústria cervejeira, contribuindo para a redução do consumo de água potável e mitigação de impactos ambientais.

PALAVRAS-CHAVE: Filtros de areia. Colmatação. CIP.

Study of the Filtration Run of Industrial Effluent Using Sand Filters at Different Filtration Rates on a Bench Scale

ABSTRACT

Objective – The main objective of this research is to evaluate the physical filtration process using sand filters on a bench scale for the treatment of industrial effluent generated in the CIP (Clean in Place) process of a brewery.

Methodology – Experimental research on a bench scale with a quantitative approach. The experimental scientific method was applied to evaluate sand filters in the treatment of brewery CIP effluents, analyzing color, turbidity, and pH according to AWWA (2012) standards.

Originality/Relevance – The study addresses a theoretical gap regarding the use of sand filtration for specific industrial effluents. It stands out for proposing a simple, low-cost, and sustainable technology aligned with SDGs 6 and 12.

Results – Filtration achieved reductions greater than 50% in color and turbidity while maintaining stable pH. Clogging increased removal efficiency, demonstrating the good performance of the system.

Theoretical/Methodological Contributions – Deepens the understanding of the filtration run and clogging in granular media, presenting a reproducible experimental model for future design applications.

Social and Environmental Contributions – Promotes water reuse and sustainable practices in the brewing industry, contributing to the reduction of potable water consumption and the mitigation of environmental impacts.

KEYWORDS: Sand filters. Clogging. CIP.

Estudio de la carrera de filtración del efluente industrial utilizando filtros de arena para diferentes tasas de filtración en escala de banco

RESUMEN

Objetivo – El objetivo general de esta investigación es evaluar el proceso físico de filtración mediante filtros de arena en escala de banco para el tratamiento de efluente industrial generado en el proceso CIP (Clean in Place) de una cervecería.

Metodología – Investigación experimental en escala de banco con enfoque cuantitativo. Se aplicó el método científico experimental para evaluar filtros de arena en el tratamiento de efluentes CIP de la industria cervecera, analizando color, turbidez y pH según las normas AWWA (2012).

Originalidad/Relevancia – El estudio aborda una brecha teórica sobre el uso de la filtración en arena para efluentes industriales específicos. Se destaca por proponer una tecnología simple, de bajo costo y sostenible, alineada con los ODS 6 y 12.

Resultados – La filtración promovió reducciones superiores al 50% en color y turbidez, manteniendo el pH estable. La colmatación aumentó la eficiencia de remoción, evidenciando el buen desempeño del sistema.



Contribuciones Teóricas/Metodológicas – Profundiza la comprensión de la carrera de filtración y colmatación en medios granulares, presentando un modelo experimental reproducible para futuros dimensionamientos.

Contribuciones Sociales y Ambientales – Fomenta la reutilización del agua y las prácticas sostenibles en la industria cervecera, contribuyendo a la reducción del consumo de agua potable y a la mitigación de impactos ambientales.

PALABRAS CLAVE: Filtros de arena. Colmatación. CIP



1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água nas atividades industriais e a escassez hídrica têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis que promovam o reuso desse recurso. No Brasil, apesar de entraves regulatórios e técnicos, o reuso constitui estratégia essencial para reduzir o consumo de água potável e a geração de efluentes, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6 e 12) da ONU (LIMA; ACHON, 2024).

Na indústria cervejira, uma das maiores consumidoras de água do setor de bebidas, o insumo é utilizado tanto na formulação do produto quanto na limpeza de equipamentos e instalações, podendo chegar a seis litros de água por litro de cerveja produzido (ROSARIO, 2023). Dentre as correntes de efluentes geradas, destaca-se o proveniente do processo *Cleaning in Place* (CIP), que utiliza soluções químicas em circuito fechado e gera efluentes com alta variabilidade físico-química.

Nesse contexto, o tratamento descentralizado do efluente do CIP surge como alternativa estratégica para o reuso de água. A filtração em areia destaca-se por ser um processo simples, de baixo custo e eficiente na remoção de sólidos e turbidez, podendo viabilizar o reúso em etapas menos críticas da produção (ALVES et al., 2024; SILVA, 2023). Assim, a aplicação dessa tecnologia em cervejarias representa uma oportunidade de aliar produtividade e sustentabilidade, contribuindo para o uso racional da água e o cumprimento das metas ambientais globais.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o processo físico de filtração, usando filtros de areia em escala de bancada, para o tratamento de efluente industrial gerado no processo de CIP (Clean in Place) em indústria cervejira.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Avaliar o processo físico de tratamento por filtração de areia em escala de bancada;
- Avaliar qualitativamente o efluente industrial bruto e o efluente tratado.
- Analisar diferentes volumes e taxas de filtração;
- Avaliar a carreira de filtração e colmatção do meio filtrante.

3 METODOLOGIA

A pesquisa foi conduzida em laboratório e consistiu na análise de um método físico de tratamento para o efluente gerado pelo processo de CIP (Clean in Place) da lavadora de garrafas de uma cervejaria do estado de São Paulo.

Este estudo foi parte de um projeto financiado por uma empresa, em colaboração com a Unidade EMBRAPPII, cujo projeto geral visa desenvolver novos materiais e processos para o reuso da água em cervejaria, envolvendo a participação de pesquisadores de graduação e pós-graduação, concentrando-se na pesquisa e desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para otimizar o uso da água na indústria cervejira.



Antes de iniciar os experimentos, foi realizada uma revisão da literatura, que foi atualizada ao longo da pesquisa. Esta revisão permitiu uma análise do tema e posteriormente dos resultados desta pesquisa, abrangendo a comparação dos métodos de tratamento e as características qualitativas do efluente bruto e tratado.

O processo físico previsto para tratamento do efluente de CIP, que visa a remoção da concentração de sólidos para viabilizar o reuso de água, será o de filtração, através do uso de filtros de areia em escala de bancada.

3.1 Efluente industrial bruto, coleta, identificação e armazenamento da amostra

O efluente analisado nesta pesquisa é proveniente do CIP de uma lavadora de garrafas denominada Lavadora Packaging de uma cervejaria localizada no município de Guarulhos em São Paulo. As amostras foram coletadas antes do início do projeto e realização de ensaios. Ao coletar as amostras, as mesmas foram identificadas e armazenadas em local adequado, refrigerado, no laboratório do DECiv.

3.2 Caracterização do efluente bruto

Com a definição dos parâmetros de análise foi realizada a caracterização do efluente bruto por meio dos equipamentos e métodos expostos na Tabela 1. A caracterização do efluente bruto é uma etapa indispensável, pois através dos resultados obtidos nestas análises de caracterização do efluente bruto tem-se a comparação de resultados com as amostras de efluentes que passaram pelo processo de filtração de areia em escala de bancada, sendo assim possível avaliar o desempenho dos filtros.



Tabela 1: Parâmetros analisados no efluente bruto.

Parâmetro	Unidade	Método (1)	Equipamento
Cor aparente	Pt-Co	2120 C	Espectrofotômetro DR 2010
Turbidez	NTU	2130 B	Turbidímetro 2100P
pH	-	4500-H+ B	pHmetro
Sólidos Totais	mg/L	2540 B	Mufra 550°C e estufa 103°C
Sólidos Fixos e Voláteis	mg/L	2540 E	Mufra 550°C e estufa 103°C
Sólidos Suspensos Totais	mg/L	2540 D	Funil Buchner (membrana e bomba vácuo)
Sólidos Dissolvidos Totais	mg/L	2540 C	Funil Buchner (membrana e bomba vácuo)

Fonte: Autor (2025).

(1) Método baseado na AWWA (2012)

3.3 Caracterização do efluente tratado

Os parâmetros de análise do efluente bruto utilizados neste estudo foram cor, turbidez e pH, os ensaios de sólidos não foram realizados após a filtração devido a dificuldade da realização dos ensaios e porque grande parte dos sólidos foram removidos na filtração. As análises foram realizadas segundo métodos padronizados descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (2012). A Tabela 2 apresenta os métodos aplicados para a caracterização desses parâmetros na amostra de efluente bruto utilizada nesta pesquisa.

Tabela 2: Parâmetros analisados no efluente tratado.

Parâmetro	Unidade	Método (1)	Equipamento
Cor aparente	Pt-Co	2120 C	Espectrofotômetro DR 2010
Turbidez	NTU	2130 B	Turbidímetro 2100P
pH	-	4500-H+ B	pHmetro

Fonte: Autor (2025).

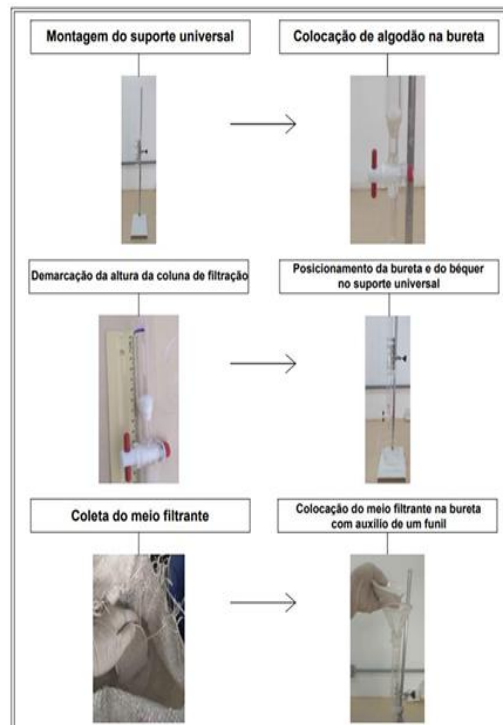


3.4 Ensaios em bancada de filtração

3.4.1 Montagem da bancada de filtração

A bancada de filtração foi montada em partes conforme testes realizados para a melhoria do funcionamento do filtro. Primeiramente foi testado apenas o filtro de areia, como na Figura 1

Figura 1: Filtro de areia testado inicialmente

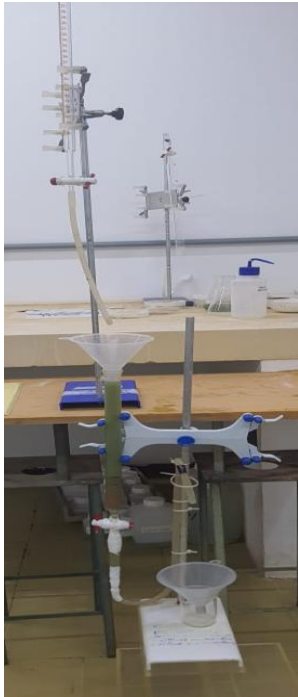


Fonte: LIMA (2025).

Após testes preliminares com o filtro foi percebido a necessidade de realizar adaptações com objetivo de buscar melhores resultados para os experimentos. Essas modificações consistiram em colocar um sifão na saída do filtro para a saturação do meio filtrante, como mostra a Figura 2, e adaptar um sistema de gotejamento da amostra antes da entrada do filtro para otimizar o processo de filtração e para realizar diferentes taxas de filtração, como mostrado na Figura 3.



Figura 2: Filtro com sifão.



Fonte: Autor (2025).

Figura 3: Filtro com gotejamento.



Fonte: Autor (2025).

3.4.2 Caracterização do meio filtrante

O meio filtrante utilizado correspondeu à areia grossa marrom, cuja caracterização granulométrica foi realizada por meio de ensaio de peneiramento, conforme procedimento laboratorial padrão. A amostra foi previamente seca em estufa, de modo a garantir a eliminação da umidade e evitar a aglomeração de partículas.

Em seguida, a massa seca foi pesada e submetida ao peneiramento em série, utilizando um conjunto de peneiras com aberturas progressivamente menores, organizadas em ordem decrescente de diâmetro. O processo foi conduzido em agitador mecânico por tempo adequado, assegurando a separação eficiente dos grãos de diferentes tamanhos.

Após o peneiramento, procedeu-se à pesagem do material retido em cada peneira, possibilitando o cálculo da porcentagem retida, do percentual acumulado e do passante correspondente. Esses dados foram posteriormente utilizados para a construção da curva granulométrica, a partir da qual são obtidos os parâmetros característicos do material, como os diâmetros representativos (D10, D30 e D60) e os coeficientes de uniformidade e curvatura.

3.4.3 Sequência de ensaios

A sequência experimental foi organizada em três experimentos distintos (A, B e C). Os experimentos A e B foram subdivididos em três ensaios sucessivos: Ensaio 1 (50 mL), Ensaio 2 (100 mL) e Ensaio 3 (150 mL). Em cada ensaio, o procedimento consistiu na percolação dos

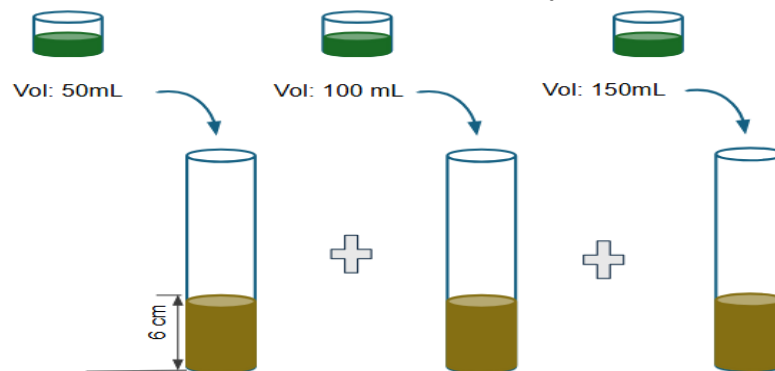
respectivos volumes da amostra sobre o leito filtrante, sob diferentes taxas de filtração, assim como mostra a Figura 4.

Antes do início dos ensaios, cada filtro foi previamente saturado com água destilada, com o objetivo de estabilizar o meio filtrante e evitar variações decorrentes da absorção inicial de umidade pelo material.

Antes do início do gotejamento com a amostra, também, foi realizado o ajuste do sistema de gotejamento. Para isso, utilizou-se água como fluido de calibração. Para a calibração do sistema de gotejamento, foram coletados 50 mL de água e a válvula foi regulada de forma que esse volume fosse escoado em um tempo de 2 minutos e 40 segundos. Essa configuração assegurou que o sistema operasse com uma taxa de filtração compatível com o intervalo desejado, entre 60 e 100 m³/dia/m². As diferentes taxas de filtração teórica utilizada nos experimentos foram valores dentro desse intervalo, todavia devido a dificuldade de controlar essas taxas com a amostra de efluente as taxas de medidas saíram desse intervalo.

Após a percolação de cada volume, foram monitorados os parâmetros de qualidade da água — cor aparente, turbidez e pH — selecionados por constituírem indicadores relevantes do desempenho do processo de filtração em sistemas de tratamento de efluentes. A determinação desses parâmetros em diferentes etapas experimentais possibilitou a avaliação da eficiência imediata de remoção de impurezas, bem como da evolução do desempenho do filtro em função do aumento da carga de sólidos em suspensão.

Figura 4: Experimentos A e B com 3 (três) ensaios sequenciais (Ensaio 1, 2 e 3), sem troca do meio filtrante e diferentes taxas de filtração.



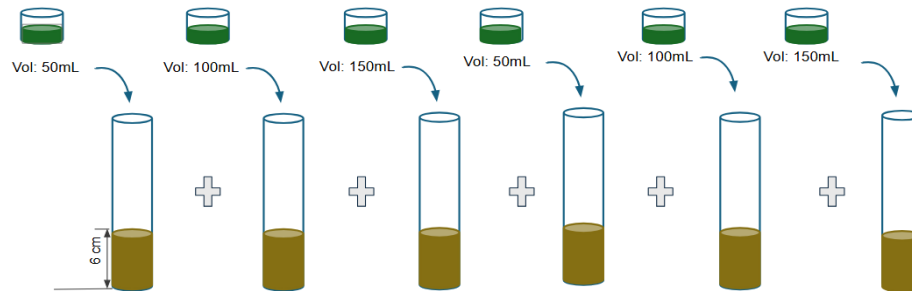
Fonte: Autor (2025).

Após os experimentos A e B, foi inserido um novo meio filtrante, com as mesmas características do anterior, a fim de dar continuidade à investigação. O objetivo desta segunda etapa foi avaliar novamente os parâmetros de qualidade da água já monitorados anteriormente — cor aparente, turbidez e pH — e, adicionalmente, observar o fenômeno de colmatção do filtro, decorrente da progressiva obstrução dos poros pelo acúmulo de partículas.

A Figura 5 mostra como o experimento foi conduzido com a aplicação sequencial de volumes de 50 mL, 100 mL e 150 mL, repetidos em duas séries consecutivas (50 + 100 + 150 + 50 + 100 + 150), totalizando seis ensaios de percolação no mesmo filtro. Esse procedimento

possibilitou analisar a variação dos parâmetros de qualidade da água em função do aumento da carga aplicada e verificar de forma mais evidente o efeito da colmatação sobre a eficiência do meio filtrante.

Figura 5: Experimento C com 6 (seis) ensaios sequências (Ensaio 1 a 6), sem troca do meio filtrante, para avaliar a carreira de filtração e colmatação.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 3 mostra de forma resumida e simplificada como os experimentos foram divididos para serem realizados.

Tabela 3: Resumo dos 3 (três) experimentos (A, B e C) realizados, totalizando 12 (doze) ensaios, com volume de amostra utilizada e taxa de filtração em cada ensaio.

Experimento	Ensaio	Meio filtrante (areia grossa)	Volume amostra (mL)	Volume Acumulado de amostra (mL)	Taxa de filtração teórica (m ³ /dia /m ²)	Taxa de filtração medida (1) (m ³ /dia /m ²)
A	1a	Limpa (nova)	50	50	75	64,96
	2a	Suja (usada)	100	150		77,95
	3a	Suja (usada)	150	300		86,02
B	1b	Limpa (nova)	50	50	85	86,61
	2b	Suja (usada)	100	150		45,19
	3b	Suja (usada)	150	300		49,49
C	1c	Limpa (nova)	50	50	85	86,61
	2c	Suja (usada)	100	150		45,19
	3c	Suja (usada)	150	300		49,49



Experimento	Ensaio	Meio filtrante (areia grossa)	Volume amostra (mL)	Volume Acumulado de amostra (mL)	Taxa de filtração teórica (m ³ /dia /m ²)	Taxa de filtração medida (1) (m ³ /dia /m ²)
	4c	Suja (usada)	50	350		86,61
	5c	Suja (usada)	100	450		45,19
	6c	Suja (usada)	150	600		49,49

Nota (1) Taxa de filtração medida é determinada em laboratório após a realização dos experimentos, a partir do volume e tempo real de alimentação do filtro.

Fonte: Autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados caracterização efluente bruto

Os resultados de caracterização da amostra de efluente bruto em triplicata e sua média estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados da caracterização da amostra bruta.

Leitura	Cor (Pt-Co)	Turbidez (NTU)	pH	Sólidos Totais (mg/L)	Sólidos Totais Voláteis (mg/L)	Sólidos Totais Fixos (mg/L)	Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)
1	10540	2415	13	44,6	4,7	39,8	1,6	54,1
2	10620	2445	13	4,4	4,7	38,6	1,5	39,1
3	10300	2460	13	45,8	6,7	39,1	1,5	41,0
Média	10487	2440	13	45	5,4	39,6	1,6	44,8

Fonte: Autor (2025).

Nota-se na Tabela 4, que os valores de cor e turbidez do efluente bruto são altos, acima do limite de leitura dos equipamentos, sendo necessária a diluição e posteriormente feito a conversão dos valores. O pH da amostra demonstrou que o efluente é básico, o que é característico para efluentes industriais em função da elevada carga orgânica, e da concentração de altos teores de hidróxido de sódio e carbonato de sódio.

Observa-se que a concentração média de sólidos totais (ST) foi de 45,0 mg/L, valor que representa a soma de todas as frações de sólidos presentes na amostra. A partir da fração total, verificou-se que os sólidos totais voláteis (STV) corresponderam, em média, a 5,4 mg/L, enquanto os sólidos totais fixos (STF) apresentaram média de 39,6 mg/L. Esses resultados indicam que a amostra possui maior proporção de compostos inorgânicos (STF) em relação à fração orgânica (STV). Os sólidos suspensos totais (SST) apresentaram valores baixos, com média



de 1,6 mg/L, evidenciando que apenas uma pequena parcela dos sólidos está presente em forma particulada. Em contrapartida, os sólidos dissolvidos totais (SDT) atingiram uma concentração média de 44,8 mg/L, próxima ao valor dos ST, o que demonstra a predominância de sólidos em solução na amostra bruta.

4.2 Resultados caracterização do meio filtrante

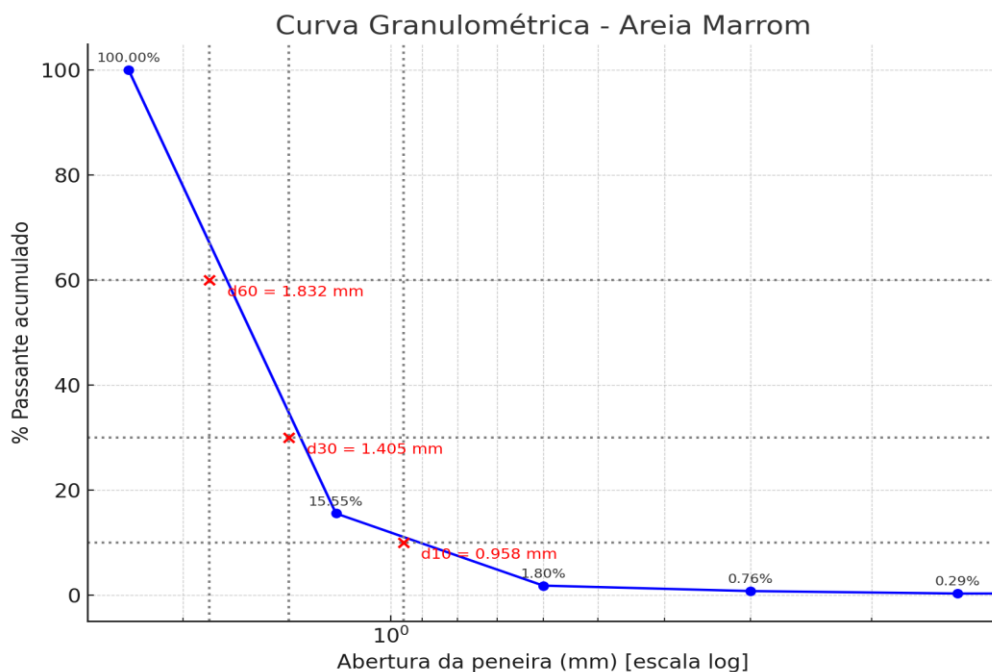
O meio filtrante estudado corresponde à areia grossa marrom, cuja análise granulométrica foi realizada por ensaio de peneiramento. A curva obtida evidenciou predominância de grãos retidos nas peneiras de abertura 1,2 mm e 0,6 mm, que juntas concentram mais de 98% da amostra. Esse resultado confirma a predominância de partículas de maior dimensão dentro da amostra analisada.

A partir da curva granulométrica (Figura 6), foram determinados os parâmetros característicos do material. O diâmetro efetivo (D10), associado ao tamanho dos grãos que correspondem a 10% do material passante, foi de aproximadamente 0,958 mm. O diâmetro D30, relacionado a 30% do material passante, apresentou valor próximo a 1,405 mm, enquanto o D60 foi estimado em 1,832 mm.

Com base nesses valores, obteve-se o coeficiente de uniformidade ($C_u \approx 1,91$) e o coeficiente de curvatura ($C_c \approx 1,13$).

Esses parâmetros permitem compreender o comportamento hidráulico do leito filtrante, relacionando o tamanho médio dos grãos à permeabilidade e ao potencial de retenção de partículas em suspensão. A caracterização granulométrica, portanto, constitui um passo essencial para o dimensionamento e avaliação de filtros de areia aplicados ao tratamento de efluentes.

Figura 6: Curva granulométrica do meio filtrante utilizado.



Fonte: Autor (2025).



4.3 Resultado dos ensaios com filtro de areia

Os resultados obtidos serão separados por experimentos e ensaios, assim como apresentado na Tabela 5 e posteriormente serão analisados individualmente. Em cada ensaio mostrado foram feitas três leituras de cor e turbidez e para representações foram utilizadas as médias entre elas.

Tabela 5: Resumo dos 3 (três) experimentos (A, B e C) realizados, totalizando 12 (doze) ensaios.

Experimento	Ensaio (médias)	Volume (ml)	Tempo de alimentação (min)	Taxa de filtração (m ³ /dia/m ²)	Tempo de filtração (min)	Vazão de filtração (ml/min)	Qualidade do efluente tratado	
							Cor	Turbidez
A	1a	50	3,2	64,96	14,65	3,41	6480	1335
	2a	100	8	77,95	30,45	3,28	7580	1630
	3a	150	14,5	86,02	61,2	2,45	6245	1390
B	1b	50	2,4	86,61	15	3,33	6470	1290
	2b	100	9,2	45,19	30,4	3,29	7665	1625
	3b	150	12,6	49,49	60	2,50	6175	1360
C	1c	50	2,4	86,61	15	3,33	6470	1290
	2c	100	9,2	45,19	30,4	3,29	7665	1625
	3c	150	12,6	49,49	60	2,50	6175	1360
	4c	50	2,4	86,61	55,3	0,90	5500	1145
	5c	100	9,2	45,19	125,0	0,80	5930	1245
	6c	150	12,6	49,49	375,0	0,40	4915	960

Fonte: Autor (2025).

4.3.1 Análise dos resultados dos experimentos A e B

Os experimentos A e B foram conduzidos de forma semelhante, diferenciando-se principalmente pelos distintos tempos de alimentação do filtro, o que resultou em variações nas taxas de filtração, conforme apresentado na Tabela 6. A taxa de filtração teórica estabelecida foi de 75 m³/dia⁻¹/m⁻² no Experimento A e de 86 m³/dia⁻¹/m⁻² no Experimento B. Entretanto, devido à variação no tempo de alimentação, verificaram-se desvios em relação às taxas teóricas. Apesar dessas diferenças, os valores de vazão de filtração (calculados pela razão entre o volume



percolado e o tempo de passagem no filtro) mantiveram-se próximos entre os dois experimentos, como ilustrado na Figura 7.

Quanto à qualidade do efluente tratado, observaram-se melhorias em comparação ao efluente bruto. Entre os parâmetros monitorados, o pH foi o único que não apresentou alteração, mantendo-se em 13 tanto no afluente quanto no efluente filtrado. Em contrapartida, a cor aparente e a turbidez apresentaram reduções expressivas após o processo de filtração.

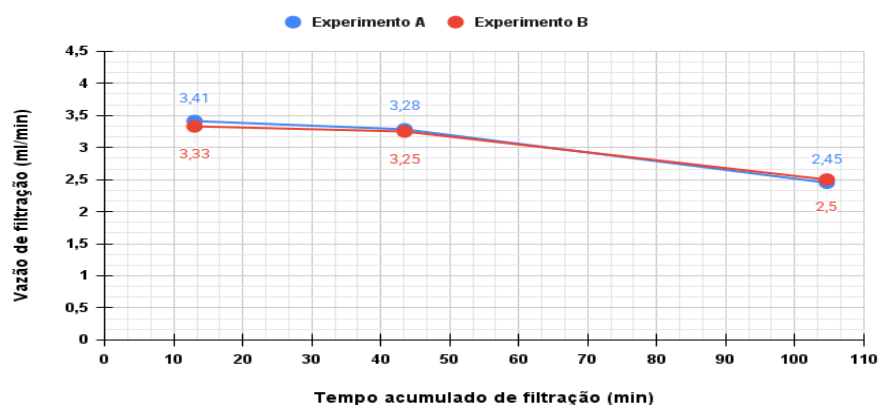
Experimento	Ensaio (médias)	Volume (ml)	Tempo de alimentação (min)	Taxa de filtração (m ³ /dia/m ²)	Tempo de filtração (min)	Vazão de filtração (ml/min)	Qualidade do efluente tratado	
							Cor (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
A	1a	50	3,2	64,96	14,65	3,41	6480	1335
	2a	100	8	77,95	30,45	3,28	7580	1630
	3a	150	14,5	86,02	61,2	2,45	6245	1390
B	1b	50	2,4	86,61	15	3,33	6470	1290
	2b	100	9,2	45,19	30,4	3,29	7665	1625
	3b	150	12,6	49,49	60	2,50	6175	1360

Tabela 6: Resultados dos Experimentos A e B.

Fonte: Autor (2025).

Mesmo após a realização do processo de filtração em leito de areia, os valores de cor aparente e turbidez permaneceram elevados, sendo necessária a diluição das amostras para possibilitar a leitura instrumental. Posteriormente, os resultados foram corrigidos por meio da aplicação do respectivo fator de conversão.

Figura 7: Resultados do Experimento A e B com evolução da vazão de filtração em mL/min em relação ao tempo acumulado para diferentes taxas de filtração.



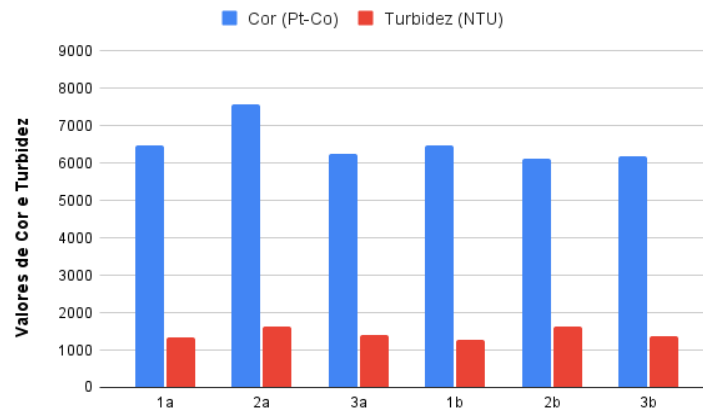
NOTA: Experimento A (Taxa de filtração teórica de 75 m³/dia/m²) e Experimento B (Taxa de filtração teórica de 86 m³/dia/m²)



Fonte: Autor (2025).

A Figura 8 apresenta os valores de cor e turbidez observados nos experimentos A e B, permitindo a comparação do desempenho dos filtros em relação a esses parâmetros de qualidade do efluente.

Figura 8: Resultados de cor e turbidez do Experimento A e B



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que a variação entre as amostras foi baixa, indicando pouca dispersão dos dados. Isso mostra que o filtro de areia grossa atua de forma semelhante mesmo com diferentes taxas de filtração.

De acordo com a Tabela 7, a eficiência de remoção de cor variou entre 26,91% e 41,12%, enquanto a remoção de turbidez situou-se entre 33,20% e 47,13% para os experimentos A e B.



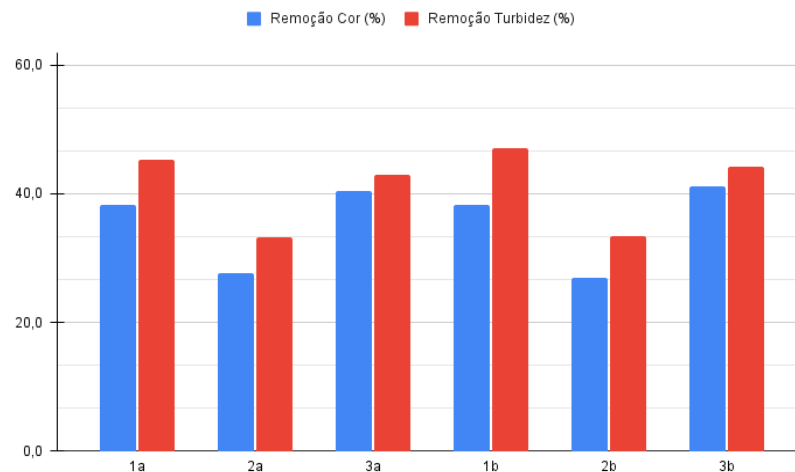
Tabela 7: Porcentagem de remoção de cor e turbidez do efluente nos Experimentos A e B.

Ensaio	Taxa de remoção %	
	Cor (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
1a	38,2	45,3
2a	27,7	33,2
3a	40,4	43,0
1b	38,3	47,1
2b	26,9	33,4
3b	41,1	44,3

Fonte: Autor (2025).

A Figura 9 ilustra as porcentagens de remoção apresentadas na Tabela 7.

Figura 9: Porcentagem de remoção de cor e turbidez nos Experimentos A e B



Fonte: Autor (2025).

Segundo Di Bernardo (2003), a filtração dupla é mais eficiente na remoção de cor e turbidez, pois combina duas etapas: uma ascendente (pré-filtração) com material mais grosso, como pedregulho ou areia grossa, e uma descendente (filtro rápido) com areia fina. Após a coagulação, a água passa primeiro pelo filtro ascendente, que remove de 60% a 85% da turbidez, e depois pelo filtro descendente, que elimina as partículas remanescentes, alcançando turbidez final inferior a 5 NTU e, em casos mais críticos, até 0,5 uT, com eficiência superior a 99%. O



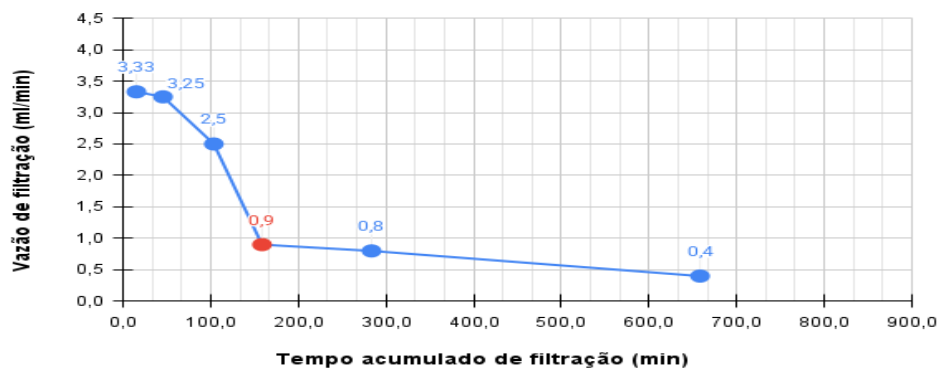
sistema apresenta boa estabilidade frente a variações da água bruta e também se destaca na remoção de cor, superando a filtração simples por combinar retenção em profundidade e adsorção em dois meios distintos.

4.3.2 Análise dos resultados do experimento C

O Experimento C foi conduzido como uma repetição do experimento B, diferenciando-se pela substituição do meio filtrante e pela continuidade da operação com a passagem de volumes adicionais de amostra (50, 100 e 150 mL). Os resultados obtidos mostraram que, à medida que volumes progressivamente maiores eram filtrados, ocorreu uma redução acentuada na vazão de filtração. Esse comportamento indica o início do processo de colmatção do leito, caracterizado pelo acúmulo de partículas nos espaços porosos da areia, o que aumenta a resistência hidráulica à passagem da água e compromete a manutenção da vazão de filtração inicial.

Conforme ilustrado nas Figuras 10, 11 e 12, a diminuição gradativa da vazão evidencia que o filtro de areia atinge um limite operacional à medida que sua estrutura interna se torna mais compactada pelo material retido. Esse fenômeno é característico em sistemas de filtração em meio granular e reflete diretamente a redução da permeabilidade do leito, levando à perda de eficiência hidráulica e, conseqüentemente, à necessidade de interrupção da operação para lavagem ou substituição do meio filtrante.

Figura 10: Evolução da vazão do filtro com relação ao tempo acumulado dos ensaios para avaliação de colmatção.

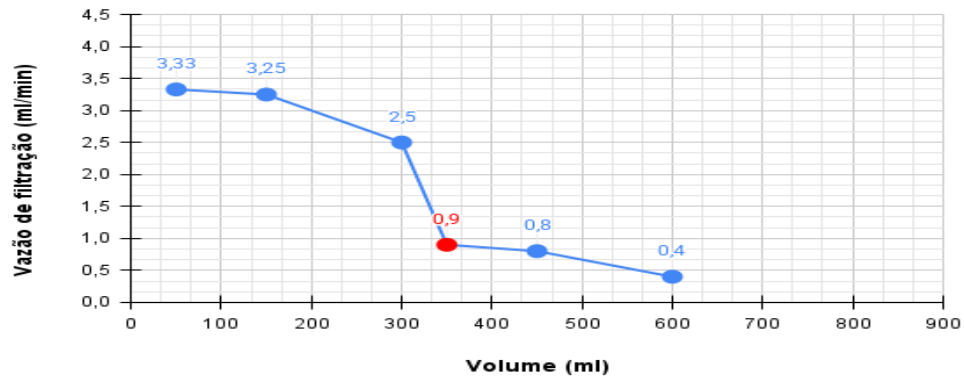


NOTA: Ponto destacado na cor vermelha (0,9 ml/min) e (158 min) representa o início da colmatção.

Fonte: Autor (2025).



Figura 11: Evolução da vazão do filtro com relação ao volume acumulado dos ensaios para avaliação de colmatação.



NOTA: Ponto destacado na cor vermelha (0,9 ml/min) e (350 mL) representa o início da colmatação.
Fonte: Autor (2025).

Figura 12: Fotografia do momento de colmatação do filtro durante o Experimento C.



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 8 apresenta os índices de remoção de cor e turbidez obtidos no experimento C. Apesar da ocorrência de colmatação do filtro, evidenciada pela redução da vazão de filtração, os resultados demonstraram maiores eficiências de remoção em comparação aos filtros que não sofreram colmatação.



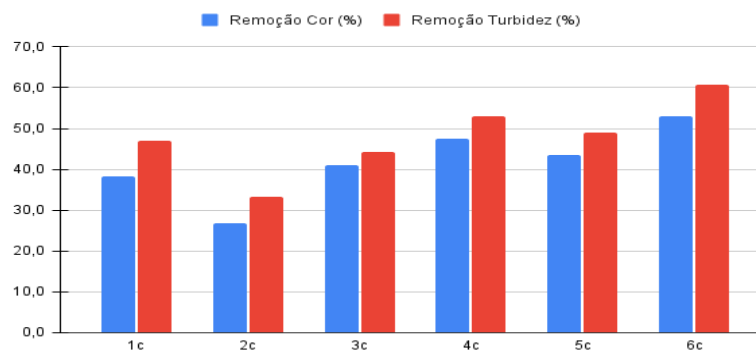
Tabela 8: Remoção de cor e turbidez no Experimento C

Ensaio	Porcentagem de remoção %	
	Cor (Pt-Co)	Turbidez (NTU)
1c	38,3	47,1
2c	26,9	33,4
3c	41,1	44,3
4c	47,6	53,1
5c	43,5	49,0
6c	53,1	60,7

Fonte: Autor (2025).

A Figura 13 representa as porcentagens de remoção apresentadas na Tabela 8 de uma forma mais ilustrativa.

Figura 13: Porcentagem de remoção de cor e turbidez no Experimento C.



Fonte: Autor (2025).

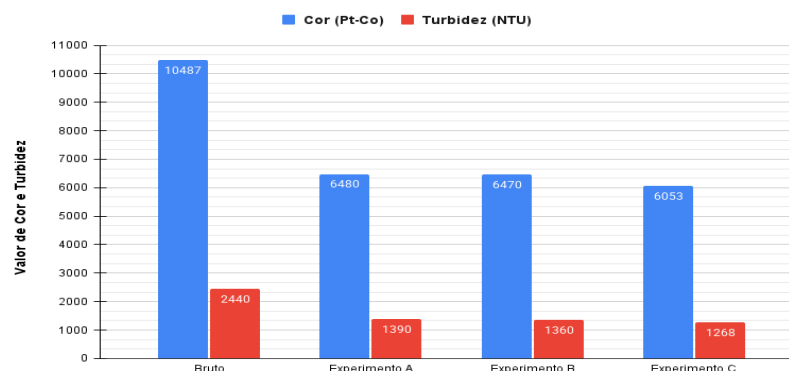
A Figura 13 mostra que, no Experimento C, a remoção de turbidez foi maior que a de cor, indicando maior eficiência do meio filtrante para partículas em suspensão. Observou-se ainda aumento da eficiência ao longo das repetições, relacionado ao avanço da colmatação do filtro. Esse comportamento ocorre devido ao acúmulo de partículas no leito filtrante, que reduz os poros e forma uma camada superficial capaz de reter mais impurezas. A menor vazão resultante também aumenta o tempo de contato da água com o meio, favorecendo a retenção e a adsorção. Assim, embora a colmatação reduza a eficiência hidráulica, ela contribui para a melhoria da remoção de cor e turbidez.



4.3.3 Comparação do efluente bruto e efluente tratado

A eficiência do filtro de areia é evidenciada na Figura 14, que compara os três experimentos com o efluente bruto. Observa-se que a remoção de cor e turbidez apresenta melhora progressiva com o aumento do tempo de uso do filtro, confirmando o desempenho do meio filtrante.

Figura 14: Resultados dos valores médios de cor e turbidez do efluente bruto e tratados nos 3 (três) experimentos realizados (A, B e C).



Fonte: Autor (2025).

Para a elaboração do gráfico da Figura 14 foi necessário calcular as médias dos resultados de cada experimento, a fim de possibilitar a comparação com a amostra bruta. Assim, os valores foram obtidos pela média aritmética das repetições (por exemplo, $(1a + 1b + 1c)/3$, e assim sucessivamente para as demais etapas). Mesmo após esse tratamento dos dados, os índices de cor e turbidez apresentaram reduções significativas, evidenciando a eficiência do processo de filtração.

4.4 Comparando o filtro de areia com outros métodos e aplicações

A filtração em areia se destaca como uma alternativa simples e eficiente para a remoção de partículas em suspensão e a redução da turbidez de efluentes industriais, apresentando baixo custo de implantação e operação. Entretanto, seu desempenho é fortemente dependente das características do efluente e dos mecanismos físicos de peneiramento e sedimentação intersticial, limitando sua eficiência à remoção de sólidos em suspensão. Por essa razão, o filtro de areia deve ser compreendido e aplicado principalmente como uma etapa de pré-tratamento, responsável por reduzir a carga de sólidos e proteger unidades de tratamento subsequentes, como microfiltração, ultrafiltração, flotação, ozonização ou processos biológicos. Essa configuração integrada permite maior estabilidade operacional, prolonga a vida útil das etapas seguintes e contribui para a eficiência global do sistema.

Além disso, os resultados do processo de filtração em areia podem ser significativamente aprimorados quando o efluente é submetido previamente a uma etapa de



centrifugação, uma vez que essa operação remove frações mais densas e reduz a carga inicial de sólidos totais. Com isso, diminui-se o risco de colmatação precoce do meio filtrante e melhora-se a uniformidade do fluxo durante a operação, resultando em maior eficiência de remoção e maior durabilidade do filtro.

Em comparação com técnicas mais avançadas, a filtração em areia apresenta limitações quanto à remoção de compostos dissolvidos, matéria orgânica de baixa massa molecular e microrganismos, não sendo suficiente, isoladamente, para produzir um efluente de qualidade para reúso em etapas críticas. Em escala industrial, especialmente em cervejarias, sua aplicação requer controle rigoroso das taxas de filtração, lavagem periódica do meio e monitoramento da colmatação. Apesar dessas limitações, a simplicidade construtiva, o baixo custo e a compatibilidade com outras tecnologias de tratamento tornam o sistema uma solução tecnicamente viável e ambientalmente sustentável, contribuindo para o reúso seguro da água em atividades menos exigentes do processo produtivo.

4.5 manutenção do meio filtrante

A manutenção adequada dos filtros de areia é essencial para garantir a eficiência do processo de filtração e a longevidade do meio filtrante em sistemas de tratamento de efluentes industriais. Durante a operação, ocorre o acúmulo de sólidos nos poros da areia, o que aumenta a perda de carga, tornando necessária a retrolavagem. Esse procedimento consiste na inversão do fluxo de água, frequentemente associada à injeção de ar, para promover a expansão e limpeza do leito filtrante, removendo o material retido e restaurando a permeabilidade do meio. Segundo Penna (2009), a retrolavagem deve ser conduzida de forma controlada, com abertura gradual das válvulas, a fim de evitar danos estruturais no leito, como desarranjo das camadas, perda de areia e formação de zonas preferenciais de escoamento. Dessa forma, a manutenção periódica, com retrolavagens bem conduzidas e monitoramento das condições do meio filtrante, é fundamental para preservar a eficiência operacional do sistema e assegurar a qualidade do efluente tratado.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstraram que a filtração em areia é um processo promissor, simples e eficiente para o pré-tratamento de efluentes provenientes do processo CIP na indústria cervejeira. Mesmo diante da elevada carga inicial de sólidos em termos de cor e turbidez, o filtro promoveu reduções expressivas nesses parâmetros, ao passo que o pH manteve-se estável, preservando características compatíveis com o reúso em etapas menos críticas do processo industrial.

A análise comparativa entre os experimentos mostrou que as diferentes taxas de filtração não geraram alterações significativas na qualidade final do efluente tratado, mas tiveram impacto direto na dinâmica de colmatação do leito filtrante. Esse fenômeno, ainda que represente perda de eficiência hidráulica pela redução da vazão, contribuiu positivamente para a retenção de partículas e compostos responsáveis pela cor e turbidez. A explicação para esse comportamento está na diminuição do diâmetro efetivo dos poros e no aumento do tempo de



contato da água com o meio filtrante, que intensifica tanto a retenção física quanto processos de adsorção.

Conclui-se, portanto, que a filtração em areia apresenta potencial significativo como etapa preliminar no tratamento de efluentes de CIP, podendo ser incorporada a tecnologias complementares, como centrifugação, microfiltração ou sistemas de filtração dupla, de modo a atender padrões de reúso mais restritivos. Além de sua simplicidade operacional e baixo custo, destaca-se o caráter sustentável da técnica, que pode contribuir para a redução do consumo de água potável e para a ampliação de práticas de reúso na indústria cervejira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. P. et al. Estudo comparativo entre a eficiência de diferentes materiais como meio filtrante na filtração lenta. **Revista DAE**, São Paulo, v. 72, n. 239, p. 28-43, 2024.

BARBOSA, R. **Reuso de água na indústria: alternativas para a sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2019.

DI BERNARDO, Luiz (coord.). **Tratamento de água para abastecimento por filtração direta**. Rio de Janeiro: ABES; RIMA, 2003.

LIMA, A.; ACHON, C. Reuso de água em processos industriais: desafios regulatórios e perspectivas para o Brasil. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 145-158, 2024.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) – Agenda 2030**. Brasília: ONU Brasil, 2024.

FERNANDES, Kirlene Salgado. **Remoção de óleo do meio filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia**. 2009.



DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

- **Concepção e Design do Estudo:** A ideia central do projeto foi de Cali Laguna Achon e o desenvolvimento das metodologias foi em conjunto entre os autores.
 - **Curadoria de Dados:** Os dados foram analisados por Hugo Garcia Dalio e revisados por Cali Laguna Achon.
 - **Análise Formal:** Ambos os autores.
 - **Aquisição de Financiamento:** Os recursos financeiros foram financiados pela EMBRAPII e por doação do efluente pela cervejaria.
 - **Investigação:** Os experimentos práticos foram conduzidos por Hugo Garcia Dalio.
 - **Metodologia:** Ambos os autores.
 - **Redação - Rascunho Inicial:** Hugo Garcia Dalio
 - **Redação - Revisão Crítica:** Cali Laguna Achon
 - **Revisão e Edição Final:** Ambos os autores.
 - **Supervisão:** Cali Laguna Achon
-

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, **Hugo Garcia Dalio e Cali Laguna Achon**, declaramos que o manuscrito intitulado " **Estudo da carreira de filtração de efluente industrial usando filtros de areia para diferentes taxas de filtração em escala de bancada**":

1. **Vínculos Financeiros:** Este trabalho foi financiado parcialmente por uma empresa parceira em colaboração com a **Unidade EMBRAPII**, no âmbito de um projeto de pesquisa sobre reuso de água em cervejarias.
 2. **Relações Profissionais:** Mantenho vínculo acadêmico com a **Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)**, instituição à qual está vinculado o desenvolvimento desta pesquisa.
 3. **Conflitos Pessoais:** Nenhum conflito de interesse pessoal relacionado ao conteúdo do manuscrito.
-