

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE INCORPORAÇÃO DE CINZAS DO BAGAÇO
DA CANA-DE-AÇÚCAR EM NANOFIBRAS POLIMÉRICAS PARA USO COMO
MEIOS FILTRANTES**

Júlia Aparecida Sanson

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof^ª Vádila Giovana Guerra Béttega

São Carlos - SP
2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a minha família, em especial minha mãe, Kátia, meu pai, Márcio, e meus irmãos, Luiz Gustavo e Lucas, por sempre me incentivarem nos estudos, apoiarem meus sonhos e comemorarem minhas conquistas, sem vocês nada disso seria possível. Também gostaria de agradecer todos os amigos que fizeram parte da minha trajetória em São Carlos, por criarmos uma rede de apoio essencial para enfrentar os momentos difíceis e para celebrar nossas conquistas juntos, criando memórias especiais que guardarei para sempre. Agradeço à Professora Doutora Vádila Giovana Guerra Béttega por toda ajuda, orientação e conhecimento compartilhado comigo durante os anos de pesquisa e pela gentileza e dedicação ao exercer sua profissão, tornando-se um exemplo e inspiração para mim, e agradeço ao Doutor Felipe de Aquino Lima por todo o apoio e suporte nas práticas de laboratório, análise de resultados e elaboração de relatórios. Sua ajuda foi essencial para o desenvolvimento da minha pesquisa e do meu crescimento acadêmico. Ao Programa de Recursos Humanos (PRH -39), agradeço pela oportunidade de me especializar em um setor tão relevante para o futuro e interessante para mim, o de biocombustíveis; à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro.

RESUMO

Com a intensificação da industrialização, o descarte de contaminantes na atmosfera cresceu, causando impactos no meio ambiente. Além disso, a alta geração de resíduos agroindustriais têm motivado o reaproveitamento de materiais. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias capazes de tratar o ar e efluentes poluídos se torna cada vez mais necessário, bem como a descoberta de aplicações com maior valor agregado para os resíduos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade de incorporação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em nanofibras poliméricas para uso como meios filtrantes para o tratamento de ar e água contaminados. As cinzas passaram por moagem e peneiramento e realizou-se a caracterização do material, a fim de obter a distribuição de tamanho das partículas, densidade, área superficial e composição química. Nanofibras de acetato de celulose foram produzidas utilizando a técnica de eletrofiação (ou *electrospinning*). As cinzas foram adicionadas à solução polimérica, variando sua massa de 185 a 1000 mg. A eficiência na coleta de nanopartículas do ar foi medida com um analisador de partículas por mobilidade elétrica e a queda de pressão com um manômetro digital. Testes de adsorção foram feitos com solução de azul de metileno em uma unidade experimental e os resultados foram obtidos utilizando um espectrofotômetro UV/ VIS. A caracterização das cinzas indicou seu caráter adsorvente, dada a alta área superficial das amostras, na faixa de 51,40 a 95,40 m²/g, e a presença de dióxido de silício em 80,77%. Com relação à incorporação, a adição de cinzas alterou as características estruturais e morfológicas das nanofibras, causando uma diminuição no diâmetro. Dentre os meios filtrantes produzidos, os que apresentaram melhores desempenhos foram os de 6 horas de eletrofiação, com destaque para os de 185 e 500 mg de CBCA. Dessa forma, os resultados indicam que a incorporação das cinzas em nanofibras se mostra promissora.

Palavras-chave: Cinzas do Bagaço de Cana-de-açúcar, Nanofibras, Electrospinning, Meios Filtrantes

ABSTRACT

With the intensification of industrialization, the discharge of contaminants into the atmosphere increased, causing impacts on the environment. Furthermore, the high generation of agro-industrial waste has motivated the reuse of materials. In this sense, the development of technologies capable of treating polluted air and effluents becomes increasingly necessary, as well as the discovery of applications with greater added value for waste. Thus, the objective of this work was to evaluate the feasibility of incorporating sugar cane bagasse ash into polymeric nanofibers for use as filtering media for the treatment of contaminated air and water. The ash underwent grinding and sieving and the material was characterized to obtain particle size distribution, density, surface area and chemical composition. Cellulose acetate nanofibers were produced using the electrospinning technique. Ash was added to the polymeric solution, varying its mass from 185 to 1000 mg. The efficiency in collecting nanoparticles from the air was measured with an electric mobility particle analyzer and the pressure drop with a digital manometer. Adsorption tests were carried out with methylene blue solution in an experimental unit and the results were obtained using a UV/VIS spectrophotometer. The characterization of the ash indicated its adsorbent nature, given the high surface area, in the range of 51.40 to 95.40 m²/g, and the presence of silicon dioxide in 80.77%. Regarding incorporation, the addition of ash changed the structural and morphological characteristics of the nanofibers, causing a decrease in diameter. Among the filter media produced, those that showed the best performance were those with 6 hours of electrospinning, with emphasis on those with 185 and 500 mg of CBCA. Therefore, the results indicate that the incorporation of ash into nanofibers is promising.

Keywords: Sugarcane Bagasse Fly Ash, Nanofibers, Electrospinning, Filtration

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Esquema do dispositivo de eletrofiliação horizontal.....	14
Figura 2.2. Mecanismos de coleta de partículas na filtração de ar.....	16
Figura 3.1. Esquema da unidade experimental de filtração.....	21
Figura 3.2. Esquema da unidade experimental de teste de adsorção.....	22
Figura 3.3. Curva de calibração e equação para cálculo da concentração de azul de metileno a partir da absorbância.....	23
Figura 4.1. Imagens das cinzas geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura em diferentes ampliações: a) 1200 x, b) 5000 x, c) 10000 x e d) 100000 x.....	26
Figura 4.2. Imagens dos meios filtrantes geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura em ampliação 5000 x: a) Sem CBCA, b) 185 mg de CBCA, c) 500 mg de CBCA e d) 1000 mg de CBCA.....	29
Figura 4.3. MEV do meio filtrante com 1000 mg de CBCA (a) com mapeamento de Silício (b).....	29
Figura 4.4. Eficiência fracionária para os meios filtrantes eletrofiados por 1 h.....	32
Figura 4.5. Eficiência fracionária para os meios filtrantes eletrofiados por 6 h.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Efeitos dos parâmetros de eletrofiação sobre a morfologia das fibras.	14
Tabela 4.1. Resultados do peneiramento das cinzas após a moagem.	24
Tabela 4.2. Resultados da análise Malvern Mastersizer.	24
Tabela 4.3. Densidade e área superficial das amostras de CBCA.	25
Tabela 4.4 Resultados da Fluorescência de Raio X (FRX) e da Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS).	27
Tabela 4.5. Tamanho do diâmetro médio das nanofibras.	28
Tabela 4.6. Valores de concentração mássica e por número de nanopartículas e diâmetros mediano, médio e desvio padrão geométrico da distribuição de tamanho na entrada dos filtros produzidos em 1 hora de eletrofiação.	30
Tabela 4.7. Valores de concentração mássica e por número de nanopartículas e diâmetros mediano, médio e desvio padrão geométrico da distribuição de tamanho na entrada dos filtros produzidos em 6 horas de eletrofiação.	30
Tabela 4.8. Eficiência global, queda de pressão e fator de qualidade dos meios filtrantes produzidos na coleta de nanopartículas do ar.	31
Tabela 4.9. Constantes de permeabilidade k_1 dos meios filtrantes.	34
Tabela 4.10. Concentração de azul de metileno (mg/L) na saída dos filtros para três tempos diferentes de coleta.	35
Tabela 4.11. Eficiência média dos meios filtrantes produzidos na adsorção de azul de metileno.	36
Tabela 4.12. Comparação das condições adotadas entre o presente trabalho e estudo de Alvarenga e Correa (2021).	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus celsius
AC	Acetato de celulose
BET	Brunauer-Emmett-Teller
CBCA	Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar
cm	Centímetro
cm ³	Centímetro cúbico
CuO	Óxido de cobre
DMSO	Dimetilsulfóxido
EDS	Espectrometria por Energia Dispersiva
FRX	Fluorescência de Raio X
g	Gramma
h	Hora
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
K ₂ O	Óxido de potássio
kV	Quilo volt
L	Litro
mA	Micro ampere
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min	Minuto
mL	Mililitro
mm	Milímetro
NaCl	Cloreto de sódio
nm	Nanômetro
pH	Potencial hidrogeniônico
pHzpc	Potencial hidrogeniônico ao ponto de carga zero
ppm	Parte por milhão
PVC	Policloreto de Vinila
Pa	Pascal
rpm	Rotação por minuto
SiO ₂	Sílica

LISTA DE SÍMBOLOS

μ	Micro
ν	Viscosidade do fluido
ρ	Densidade do fluido
σ	Desvio padrão
v	Velocidade de superfície de fluido

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	9
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar	12
2.2	Eletrofiação	13
2.3	Filtração de Ar	15
2.4	Adsorção de Azul de Metileno	17
3.	METODOLOGIA	18
3.1	Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar	18
3.2	Caracterização	18
3.3	Preparo dos Meios Filtrantes	19
3.4	Incorporação das CBCA	20
3.5	Análise dos Meios Filtrantes	20
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1	Tratamento e Caracterização das Cinzas	24
4.2	Incorporação das CBCA	27
4.3	Coleta de Nanopartículas do Ar	30
4.4	Adsorção de Azul de Metileno da Água	35
5.	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE A – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 2.	45
	APÊNDICE B – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 3.	46
	APÊNDICE C – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 4.	47
	APÊNDICE D – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 5.	48

1. INTRODUÇÃO

A busca por tecnologias de tratamento e remoção de poluentes do meio ambiente têm se tornado cada vez mais frequente no mundo, visto que os impactos ambiental e de saúde pública causados pelo descarte de contaminantes são crescentes na atualidade. Além disso, o reaproveitamento de matérias-primas dentro da cadeia produtiva é uma ação importante para a implementação da economia circular e para a preservação dos recursos naturais.

Neste contexto, a utilização de adsorventes eficientes e baratos, obtidos a partir de resíduos industriais e agrícolas, ganham a atenção de pesquisadores e do setor industrial por permitirem uma aplicação em larga escala. Dentre esses resíduos, vêm sendo utilizados, por exemplo, resíduos de diesel, biocarvão e cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, materiais estes que demonstraram potencial para aplicação em meios filtrantes (Loh *et al.*, 2013). Dos materiais citados, as cinzas do bagaço de cana-de-açúcar (CBCA), geradas a partir da queima da biomassa, possuem excelentes características adsorventes (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015) e se destacam no cenário brasileiro, dado o grande número de usinas sucroalcooleiras no país (Novacana, 2025).

Pesquisas recentes analisaram o potencial do material em diferentes aplicações, como substituto do cimento na produção de concreto para construção civil, enchimento de compósitos, inibidor de enzimas e em sistemas de adsorção e absorção (Loh *et al.*, 2013). Especificamente nos trabalhos explorando seu caráter adsorvente, as cinzas da cana-de-açúcar demonstraram eficiência para remoção de poluentes da água, como o azul de metileno, amônia e metais pesados (Alvarenga; Correa, 2021).

Pode-se citar, ainda, a necessidade de se desenvolver tecnologias mais eficientes e acessíveis para o tratamento e limpeza do ar, principalmente pelo alto nível de industrialização e urbanização do mundo. Dentre as técnicas de filtração do ar, as nanofibras poliméricas se destacam por apresentarem alta eficiência e baixa queda de pressão em sistemas de filtração (Bortolassi, 2019). Vários estudos vêm demonstrando que meios filtrantes contendo nanofibras são promissores para a aplicação na filtração de ar (Bortolassi, 2019; De Oliveira; Aguiar; Guerra, 2020; Bonfim *et al.*, 2021), inclusive para coleta de nanopartículas. A coleta de partículas por meios filtrantes fibrosos ocorre principalmente devido aos mecanismos gravitacional, interceptação direta, impactação e difusão browniana. A eficiência de coleta de partículas é influenciada pelas características dos meios filtrantes, condições

operacionais do filtro e diâmetro das partículas a serem coletadas. No caso das partículas em escala nanométrica, o mecanismo de coleta predominante é o difusional e a filtração com nanofibras é favorecida, devido às fibras apresentarem a mesma ordem de grandeza das partículas. A modificação e funcionalização das nanofibras eletrofiadas pode ser realizada por meio da incorporação de aditivos às nanofibras. Estudos da literatura já investigaram a adição de ativos, como nanopartículas de ZnO, TiO₂, SiO₂, Al₂O₃ e CuO, em fibras eletrofiadas para melhorar sua capacidade de filtração de poluentes atmosféricos e aumentar sua resistência mecânica, térmica e química (Bortolassi *et al.*, 2019a; Bortolassi *et al.*, 2019b; Wang *et al.*, 2014; Saud *et al.*, 2015; Shalaby *et al.*, 2018).

Em relação a cinzas, a maioria dos estudos encontrados na literatura avaliam a capacidade de adsorção das cinzas puras ou em formato de zeólitas (Ge; Yoon; Choi, 2018), sendo que a maior parte dos trabalhos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar estudam a remoção de poluentes da água (Oliveira; Cunha; Ruotolo, 2019; Alvarenga; Correa, 2021; Praipipat *et al.*, 2023; Praipipat; Ngamsurach; Roopkhan, 2023) e não do ar. Aliar as características favoráveis das nanofibras à filtração e ao efeito de adsorção das cinzas do bagaço da cana-de-açúcar mostra-se muito promissor do ponto de vista ambiental, já que envolve o aproveitamento de um resíduo industrial para o desenvolvimento de um meio filtrante aplicado à filtração de ar. Dessa forma, a escassez de estudos sobre a influência da incorporação de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em nanofibras aplicadas à filtração de ar foi a principal motivação para esse estudo.

Considerando a abordagem de temas importantes como a reutilização de resíduos agroindustriais e o estudo de técnicas de filtração para limpeza do ar, o trabalho apresenta relação com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, documento aprovado em 2015 pela Assembleia Geral das Nações Unidas que apresenta os 17 objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) (Da Silva, 2018). O termo “Desenvolvimento Sustentável” foi apresentado pela primeira vez em 1987 no Relatório de Brundtland, sendo definido como aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades (Ipiranga; Godoy; Brunstein, 2011). Nesse contexto, os ODS’s precisam ser analisados a partir de quatro dimensões do desenvolvimento sustentável: social, econômica, ambiental e institucional (Da Silva, 2018).

Dessa forma, é observada a contribuição do presente trabalho para o ODS 3, de assegurar uma vida saudável e promover o bem-estar para todas e todos, em todas as idades, especificamente em sua meta de “Até 2030, reduzir substancialmente o número de mortes e

doenças por produtos químicos perigosos, contaminação e poluição do ar e água do solo” (Objetivos...). A pesquisa também contribui para o ODS 12, de assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis, especialmente para sua meta de “Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso.” (Objetivos...).

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da incorporação das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em meios filtrantes para o tratamento de ar e adsorção de corante em água. Para isso, as cinzas foram moídas e posteriormente caracterizadas em relação à distribuição de tamanho, densidade, área superficial e composição química para se obter indícios do seu potencial adsorvente. Os meios filtrantes constituídos de nanofibras poliméricas de acetato de celulose foram produzidos a partir da técnica de eletrofiação. Ao final, avaliou-se o desempenho dos meios filtrantes contendo a fuligem incorporada às fibras, avaliando a sua eficiência na coleta de nanopartículas do ar, queda de pressão e a adsorção de corante em água.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) compõem o material proveniente da queima da biomassa vegetal e é gerada em grandes quantidades no Brasil anualmente. Com o avanço dos estudos sobre os malefícios da utilização de fontes não renováveis de energia, a geração limpa está sendo cada vez mais incentivada e implementada mundialmente. A energia de biomassa é uma das alternativas frente à problemática e consiste na queima de matérias orgânicas. Quando se trata da produção de energia de biomassa no Brasil, o bagaço de cana-de-açúcar é um recurso com grande aproveitamento dentre as fontes disponíveis, sendo responsável por 16,9% da oferta interna de energia e representando 8,0% da matriz elétrica do país (Empresa De Pesquisa Energética – EPE). Isto porque o país apresenta números significativos em relação à produção do setor sucroalcooleiro, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com mais de 400 usinas em toda sua extensão territorial (Novacana, 2025).

De acordo com o CONAB, estima-se que a safra de 2024/25 resultou em 677 milhões de toneladas de cana-de-açúcar produzidas no Brasil. A partir do processamento da cana, pode-se estimar a geração de 176 milhões de toneladas de bagaço, considerando a razão de 260 kg de bagaço úmido/tonelada de cana (Federação e Centro Das Indústrias Do Estado De São Paulo, 2001). Já a queima do bagaço de cana-de-açúcar na caldeira para geração de energia produz cinzas a uma razão de 6 kg de cinzas/250 kg de bagaço úmido (Federação e Centro Das Indústrias Do Estado De São Paulo, 2001). Considerando um consumo de 95% da matéria orgânica, pode-se estimar que seriam geradas mais de 4 milhões de toneladas de fuligem de cana na safra de 2024/25, caso o potencial energético fosse aproveitado integralmente. Atualmente, este resíduo é utilizado como fertilizante agrícola, retornando à cadeia produtiva da cana-de-açúcar ou ainda de outros cultivos.

O estudo de Rodríguez-díaz *et al.* (2015), focado em compreender a capacidade adsorvente da fuligem de cana-de-açúcar, analisou amostras vindas de usinas do Brasil e de Cuba e os resultados mostraram que as cinzas são compostas majoritariamente por matéria inorgânica (82%), sendo a sílica (SiO_2) a principal substância presente, correspondendo por mais de 50% da composição, seguida pelo óxido de cobre (CuO) e pelo óxido de potássio (K_2O). A presença de óxidos aumenta a capacidade adsorvente do material, pois favorece as interações

entre as cargas da superfície adsorvente com os cátions e ânions alvos da adsorção. Além disso, foi observada a presença de grupos funcionais polares nas amostras, como hidroxilas, carbonilas e ácidos carboxílicos, os quais também são responsáveis pelo mecanismo de adsorção do material (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015).

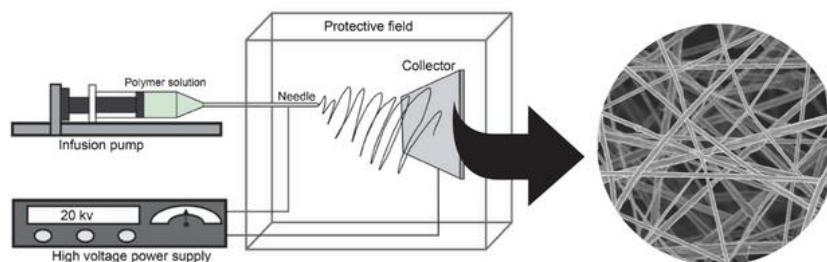
A análise do pH no ponto de energia zero (pH_{Zpc}) demonstrou que o material possui mais cargas negativas do que positivas, o que indica uma afinidade maior para interação com cátions. Porém, o material demonstra flexibilidade para adsorver diferentes materiais, dado à sua composição diversificada, que resulta na existência de superfícies positivas e negativas (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015). Outro resultado apontado na pesquisa é a pequena diferença entre a densidade aparente e a densidade compactada das partículas, um bom indício para aplicações em meios filtrantes, pois certamente terá uma baixa queda de pressão durante a operação. A análise de distribuição do tamanho do poro indicou que as amostras são materiais mesoporosos, de acordo com a classificação IUPAC, característica vantajosa para a adsorção de moléculas orgânicas de tamanho médio (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015).

2.2 Eletrofiação

A eletrofiação ou *electrospinning* é um método de produção de nanofibras e se mostra como uma tecnologia promissora para a fabricação de filtros de alta eficiência (Yun *et al.*, 2007). As vantagens da técnica estão relacionadas ao seu fácil manuseio, o que permite um controle maior sobre a estrutura e a morfologia das fibras, e à obtenção de diâmetros reduzidos e alta relação entre área e volume (Bortolassi, 2019).

O sistema do eletrofiação é formado por uma bomba de infusão, uma fonte de alta tensão e um coletor. A solução polimérica a ser utilizada para a produção das nanofibras é colocada em uma seringa de plástico com uma agulha na ponta e o conjunto é posicionado na bomba. Eletrodos são conectados à ponta da agulha e ao coletor, a fim de criar uma diferença de potencial elétrico, e à medida que a tensão elétrica aumenta, uma gota da solução se forma na ponta da agulha e vai se alongando, resultando na evaporação do solvente e deposição do polímero no coletor. A Figura 2.1 apresenta um esquema representativo de uma unidade de eletrofiação horizontal.

Figura 2.1. Esquema do dispositivo de eletrofiação horizontal.



Fonte: Adaptado de Pérez-gonzález *et al.* (2019).

Muitos parâmetros influenciam a morfologia das nanofibras obtidas a partir da eletrofiação, tanto em relação ao preparo da solução polimérica e operação da eletrofiação, como até mesmo fatores ambientais. A Tabela 2.1 apresenta os efeitos de cada parâmetro sobre o processo de eletrofiação (Pham; Sharma; Mikos, 2006).

Tabela 2.1. Efeitos dos parâmetros de eletrofiação sobre a morfologia das fibras.

Condutividade elétrica da solução	O aumento da condutividade ajuda na produção de fibras uniformes e sem gotas. Altas condutividades produzem fibras menores.
Peso molecular do polímero	Maiores pesos moleculares diminuem o número de gotas.
Vazão de alimentação	O sucesso da eletrofiação ocorre em solventes com elevada constante dielétrica.
Diferença de potencial	Vazões muito altas formam fibras que podem não secar até atingir o coletor.
Distância de trabalho	Uma distância mínima é necessária para se obter fibras secas. Para distâncias muito pequenas ou muito longas, gotas foram observadas.
Composição e geometria do coletor	Fibras mais lisas resultaram de coletores de metal. Fibras mais alinhadas foram produzidas com um cilindro rotativo.
Parâmetros ambientais	Altas temperaturas causam um decréscimo na viscosidade da solução, resultando em fibras mais finas. Alta umidade resultou no aparecimento de poros circulares nas fibras.

Fonte: Pham, Sharma e Mikos (2006).

Dessa forma, é importante obter as condições ótimas de operação para produção das nanofibras a partir da eletrofiação.

2.3 Filtração de Ar

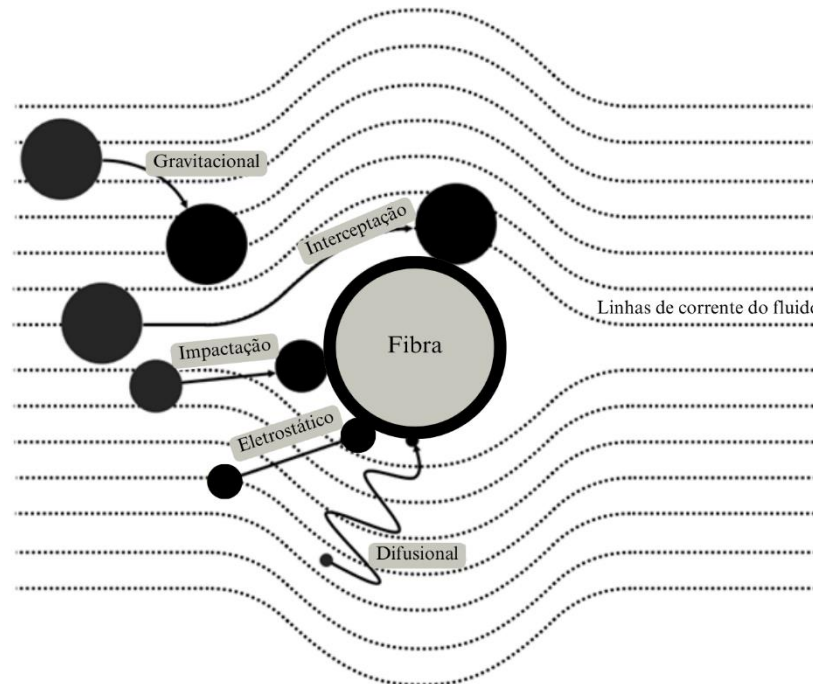
A filtração de ar é uma das técnicas mais antigas utilizadas para impedir que os poluentes contidos no fluido causem efeitos adversos no meio ambiente e na saúde humana. Com o aumento das exigências ambientais por parte da legislação e da sociedade, sua aplicação vem crescendo ainda mais nas indústrias (Bortolassi, 2019).

Para avaliar o desempenho de um filtro, dois parâmetros importantes devem ser considerados, a eficiência de coleta e a queda de pressão (Shiratsu, 2021). A eficiência de coleta é uma medida referente à retenção de partículas no meio filtrante e a queda de pressão mede a resistência do filtro à passagem do fluido (Shiratsu, 2021).

Os meios filtrantes podem ser classificados em três categorias: filtros de tecido, filtros granulares e filtros fibrosos (Dullien, 1988). Os filtros granulares consistem em leitos recheados, sendo amplamente utilizados na filtração de água, como em tratamento de efluentes e saneamento. Já os filtros de tecido são compostos por fios longitudinais e transversais que se entrelaçam, possuindo alta resistência mecânica e baixa queda de pressão. Por fim, os filtros fibrosos são estruturas não trançadas, em que as fibras são finas e dispostas de forma aleatória, proporcionando alta porosidade e alta superfície de contato para adesão de partículas (Dorman, 2014).

Na filtração de ar é possível identificar a predominância de um ou mais mecanismos físicos de coleta, fato que está relacionado com o tamanho da partícula a ser filtrada, vazão de escoamento, características do fluido e geometria estrutural do meio filtrante (Bonfim; Béttega; Aguiar, 2023). Os mecanismos de filtração são: Intercepção direta, impactação inercial, difusão browniana, efeito eletrostático e efeito gravitacional, como é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2. Mecanismos de coleta de partículas na filtração de ar.



Fonte: Adaptado de Spurny (1998)

A interceptação direta acontece quando a partícula é capturada simplesmente por se aproximar da fibra, atração causada pelas forças de Van de Waals (Lima, 2025). Esse mecanismo ocorre quando a distância entre a partícula e a fibra do meio é menor do que o raio da partícula. Dessa forma, conclui-se que o mecanismo de interceptação direta resulta da relação entre o tamanho da partícula a ser capturada e o diâmetro da fibra do coletor (Bonfim; Béttega; Aguiar, 2023).

A impactação inercial ocorre quando uma partícula entre 0,3 e 1 μm de diâmetro não consegue acompanhar as linhas de corrente do gás e colide com as fibras do coletor. O mecanismo é governado pelo número de Stokes, considerando diâmetro e densidade da partícula, velocidade e viscosidade do gás. Quanto maior o número de Stokes, maior é a chance de coleta (Bonfim; Béttega; Aguiar, 2023; Lima, 2025).

O mecanismo da difusão browniana ocorre principalmente em partículas abaixo de 0,1 μm de diâmetro e em baixas velocidades de filtração, sendo resultado do movimento aleatório que pequenas partículas realizam em um gás, saindo de sua trajetória inicial e colidindo com as fibras do coletor (Bonfim; Béttega; Aguiar, 2023; Lima, 2025).

Quando a deposição de partículas sob as fibras do coletor ocorre devido às forças eletrostáticas presentes, é chamado de mecanismo eletrostático. As forças eletrostáticas aumentam significativamente a eficiência da coleta, o que justifica a aplicação intencional com

o objetivo de melhorar o desempenho da filtração. Já o efeito gravitacional é resultado da ação da gravidade sobre as partículas, sendo favorecido por um arranjo vertical. Porém, esse mecanismo não afeta a filtração de nanopartículas, por serem muito pequenas, e pode ser considerado desprezível (Bonfim; Béttega; Aguiar, 2023; Lima, 2025).

As fibras que constituem os meios filtrantes podem ser de diversos materiais, como polímeros naturais, sintéticos e vidro, e o tamanho pode variar entre a escala micrométrica e nanométrica, sendo que as nanofibras vêm sendo amplamente utilizadas por terem baixo peso e alta permeabilidade. Neste trabalho, foi realizado o estudo de meios filtrantes fibrosos em escala nanométrica para o tratamento de ar e água contaminados.

2.4 Adsorção de Azul de Metileno

O azul de metileno (AM) é um corante catiônico amplamente utilizado na indústria têxtil, papel e couro, devido à sua alta solubilidade em água, estabilidade química e intensa coloração azul. Na indústria têxtil, em particular, o AM é frequentemente empregado para tingimento de algodão, seda e fibras sintéticas. Contudo, o descarte inadequado de efluentes contendo esse composto tem gerado sérias preocupações ambientais, uma vez que mesmo em baixas concentrações, o azul de metileno pode reduzir a penetração de luz em corpos hídricos, afetar a fotossíntese de organismos aquáticos e apresentar toxicidade tanto para organismos vivos quanto para o ser humano (Katheresan *et al.*, 2018).

A escolha do azul de metileno como molécula modelo para estudos de adsorção em materiais alternativos se justifica não apenas por sua ampla utilização industrial, mas também por suas propriedades físico-químicas que favorecem a avaliação de desempenho de novos adsorventes. O AM é facilmente detectável por espectrofotometria UV-Vis, possui estrutura aromática representativa de muitos corantes sintéticos e apresenta alta afinidade por superfícies com características ácidas ou porosas (Crini e Lichtfouse, 2019). Dessa forma, sua utilização permite uma avaliação eficaz da eficiência de novos materiais no tratamento de águas contaminadas por compostos orgânicos.

Além disso, o trabalho desenvolvido por Alvarenga e Corrêa (2021), no qual foram produzidas membranas de nanofibras poliméricas modificadas com cinzas ativadas de bagaço de cana-de-açúcar, avaliou a adsorção do corante azul de metileno, atingindo resultados promissores.

3. METODOLOGIA

3.1 Cinzas de Bagaço de Cana-de-açúcar

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) utilizadas no estudo foram provenientes da seção de descarte inferior de cinzas da caldeira de biomassa de usina localizada no interior do estado de São Paulo (Pontes Gestal). Como a técnica de limpeza de fuligem empregada na indústria em questão é a rota úmida, as cinzas coletadas estavam previamente umidificadas. Com isso, fez-se necessário deixá-las por um período de 48 h em uma estufa da marca Quimis a uma temperatura de 100 °C para promover a sua secagem, e, posteriormente, as cinzas foram submetidas à moagem e separação física. Primeiramente, cerca de 750 g do material passou pelo processo de moagem, a fim de diminuir ao máximo o tamanho das partículas. Para isso, foi utilizado um moinho de bolas (Moeller, Modelo DF 51-322-055), com 80 esferas de cerâmica de diâmetros de 3 e 4 cm, sendo 40 unidades de cada tamanho, que operou a uma rotação de, aproximadamente, 73 rpm durante 40 h. As condições de operação do moinho foram ajustadas de modo a se extrair as partículas mais finas.

Após a cominuição, as cinzas foram peneiradas e classificadas de acordo com o tamanho das partículas retidas. Foi utilizada uma sequência de peneiras de 115, 170, 200, 250, 270 e 400 Mesh junto com um agitador de peneiras magnético (Bertel, N 1614, série 0010) para auxiliar a passagem do material através das aberturas. Além disso, a distribuição de tamanho das partículas e seus diâmetros foram obtidos pela análise em meio aquoso no equipamento Malvern Mastersizer que utiliza a técnica de difração a laser para medir materiais pulverulentos.

3.2 Caracterização

As cinzas de bagaço de cana-de-açúcar e as nanofibras foram caracterizadas por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para caracterização das CBCA, as amostras foram preparadas com recobrimento com ouro por 90 segundos (Balzers Sputter Coater SCD 004 e Union CED 020), presas no porta-amostra com fita carbono e as imagens foram feitas no equipamento FEI Magellan 400 L. Já para a caracterização das nanofibras, as imagens foram feitas no microscópio Philips XL-30 FEG, com um sistema de Espectrometria por Energia

Dispersiva (EDS) acoplado da marca Bruker. É utilizado o software ImageJ para análise das imagens geradas e determinação da distribuição do diâmetro das fibras.

As amostras de cinzas também foram caracterizadas por picnometria para determinação da densidade das partículas, com a utilização de gás Hélio. Para verificar a composição das cinzas, as amostras também foram aos testes de EDS e Fluorescência de Raio X (FRX), métodos analíticos que indicam a presença dos elementos químicos no material. A área superficial das partículas foi determinada por meio do método BET (Teoria de Adsorção Multimolecular) com adsorção de nitrogênio.

3.3 Preparo dos Meios Filtrantes

Para os meios filtrantes, nanofibras poliméricas de acetato de celulose foram produzidas utilizando a técnica de eletrofiação (*electrospinning*). O sistema de eletrofiação é formado por uma bomba de infusão (Harvard Apparatus, Model Infuse 70-4500), uma seringa de plástico de 5 ml com agulha de 0,7 mm de diâmetro, uma fonte de alta tensão (HSensor, Modelo E Spin Tech, 0-25kV e 10mA), um coletor cilíndrico e rotativo de alumínio com deslocamento linear simultâneo (HSensor, Modelo CH20) e dois fios de cobre oriundos da fonte de alta tensão, que são conectados à agulha da seringa e ao cilindro coletor para criar uma diferença de potencial (Bortolassi, 2019). A solução polimérica foi introduzida na seringa e posicionada na bomba de infusão. Nesta pesquisa, foram utilizadas soluções contendo 1,2 g de acetato de celulose (AC) (97%, Sigma Aldrich) como polímero e uma mistura de 4 ml de acetona (99,5%, Êxodo Científica) e 6 ml de dimetilsulfóxido (DMSO) (>99%, $(\text{CH}_3)_2\text{SO}$, Sigma Aldrich) como solventes. Foi utilizado um substrato (Disfoil, Tecido Mosquiteiro em Fibra de Vidro revestido de PVC Antichamas, Malha 18 x 16 Fio 30) que era disposto sobre o coletor metálico e atuava como um suporte para adesão das nanofibras. A distância entre a agulha e o coletor era de 10 cm, a tensão elétrica de 14 kV, vazão de solução de 0,4 ml/h e a rotação do coletor de 350 rpm. Com relação ao tempo de coleta das fibras, foi utilizado inicialmente o valor de 1 h, que depois foi otimizado para 6 h, a fim de melhorar o desempenho da filtração e adsorção.

Os parâmetros foram determinados e ajustados experimentalmente para a produção de nanofibras resistentes, com fibras dispostas de forma aleatória e sem a formação de *beads* (pequenas esferas formadas ao longo da fibra, como resultado da solidificação das gotículas de solução polimérica durante a eletrofiação), de modo a obter uma filtração eficiente.

3.4 Incorporação das CBCA

A incorporação das CBCA nas nanofibras se deu pela adição das partículas na solução polimérica antes da eletrospinação. Para avaliar a eficiência da incorporação e aderência das partículas nas fibras, foram produzidos quatro meios filtrantes diferentes: sem a adição de CBCA, e outros três em que as massas de CBCA adicionadas foram variadas, sendo 185 mg, 500 mg e 1000 mg. Para preparar a amostra sem cinzas, a massa de AC foi pesada e os solventes foram adicionados com o auxílio de uma pipeta eletrônica (Micropipeta Plus 1-10mL Kasvi). A solução ficou em um agitador magnético (Kasvi, K40-1820H) por 8 h, na velocidade de agitação de 1000 rpm e sem aquecimento. Para as amostras com cinzas, foi incluída uma etapa de banho ultrassônico (Thornton, Model T14) de 2,5 h, a fim de dispersar as partículas uniformemente nos solventes antes da adição do polímero, e, posteriormente, a mistura seguiu normalmente para a agitação.

A metodologia de incorporação e os valores adotados para cada um dos parâmetros foram determinados com base em artigos científicos que estudaram a incorporação de cinzas e outros materiais particulados em nanofibras (Ahn; Chi; Kang, 2008; Saud *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2014; Pant *et al.*, 2019), além de testes preliminares variando as condições experimentais, visando a obtenção da homogeneização completa da solução polimérica e adequada dispersão das cinzas na solução.

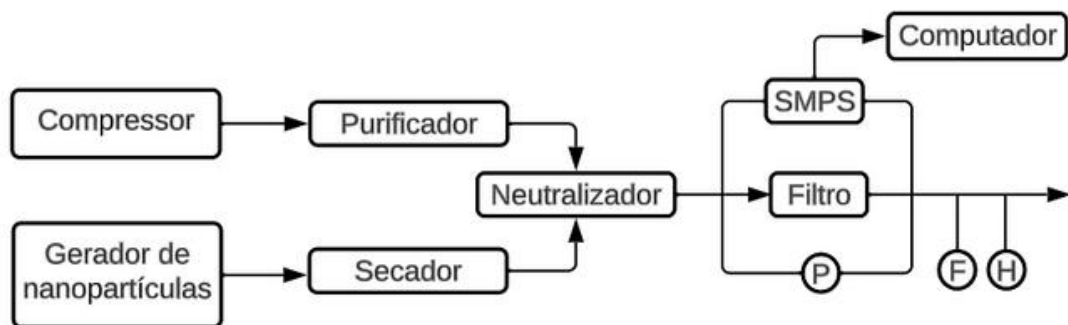
3.5 Análise dos Meios Filtrantes

Primeiramente, os meios filtrantes foram caracterizados por MEV (Philips XL-30 FEG), com um sistema EDS acoplado (Bruker) para verificar a incorporação das cinzas e comparar o efeito causado na estrutura das fibras. Os ensaios de filtração foram realizados em uma linha de filtração experimental, composta por um compressor (Schulz, Model MSV 12/175) e um sistema de purificação (TSI, Model 3074B) para o ar de alimentação, um gerador (TSI, Model 3079) e um secador difusional (TSI, Model 3062) para geração e dispersão das nanopartículas. Nos testes foi utilizada uma solução de NaCl 0,1 g/L. Em seguida, o ar passava para a linha principal, com uma fonte neutralizadora de Kr-85 (TSI, Model 3054) antes do filtro.

Para a análise da filtração, utilizou-se um analisador de partículas por mobilidade elétrica (SMPS TSI, Model 3936), composto por um classificador eletrostático (TSI, Model 3080) com um analisador de mobilidade diferencial (Long DMA, TSI, Model 3081) e um

contador de partículas (UCPC, Model 3776). Os dados foram coletados em um computador por meio do software Aerosol Instrument Manager (TSI). A unidade experimental também contava com um rotômetro (TSI, Model 4100) e um higrômetro (Hygropalm, Rotronic) para medição de vazão e umidade. A Figura 3.1 apresenta um esquema representativo da unidade experimental da linha de filtração utilizada nos testes.

Figura 3.1. Esquema da unidade experimental de filtração.



Fonte: Autoria própria.

Todos os testes de eficiência foram conduzidos a uma vazão de alimentação de ar constante igual a 1,5 L/min, que correspondia à velocidade de filtração igual a 4,8 cm/s. A área de filtração era de 5,2 cm². As eficiências globais de coleta de nanopartículas foram calculadas medindo-se as concentrações de partículas antes e após os meios filtrantes. A queda de pressão nas condições operacionais de filtração é um parâmetro importante para avaliar a aplicabilidade dos meios filtrantes a nível comercial, por isso ela foi medida, utilizando um manômetro digital (TSI, VelociCalc, Model 3A-181WP09) acoplado à linha de filtração.

A partir das medidas de queda de pressão, foi possível calcular a permeabilidade dos filtros, a qual se refere à facilidade com que o fluido atravessa o meio (Bortolassi, 2019). A Equação de Forchheimer foi utilizada para calcular a constante k_1 de permeabilidade (Scheffler; Colombo, 2006), de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\nu}{k_1} u_s + \frac{\rho_g}{k_2} u_s^2 \quad (3.1)$$

Na equação 3.1, ΔP é a queda de pressão, L é a espessura do meio filtrante, ν é a viscosidade do fluido, ρ_g é a densidade do fluido, u_s é a velocidade de superfície do fluido e k_1 e k_2 são as constantes de permeabilidade do filtro. O primeiro termo da equação refere-se à

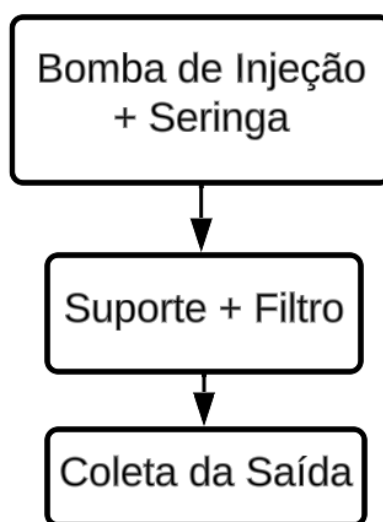
contribuição dos efeitos viscosos e o segundo, dos efeitos inerciais (Bortolassi, 2019). Como as velocidades empregadas nos testes foram baixas, considerou-se apenas o primeiro termo, obtendo o valor da constante k_1 . O valor de k_1 foi obtido a partir do coeficiente angular do gráfico de $\Delta P/L$ por v_s para cada um dos meios filtrantes.

O fator de qualidade de cada meio filtrante produzido também foi calculado, a partir da relação entre a eficiência global e a queda de pressão, de acordo com a Equação 3.2.

$$Q_f = \frac{-\ln(1-\eta)}{\Delta P} \quad (3.2)$$

A fim de avaliar a capacidade adsorvente dos filtros produzidos, foram realizados também testes de adsorção com azul de metileno. Os ensaios foram feitos em uma unidade experimental composta por uma bomba de infusão (Harvard Apparatus, Model Infuse 70-4500), uma seringa de plástico de 10 ml, um suporte de filtro de plástico e três béqueres de vidro de 50 ml para coletar as amostras. Um esquema da unidade experimental é apresentado na Figura 3.2 a seguir.

Figura 3.2. Esquema da unidade experimental de teste de adsorção.

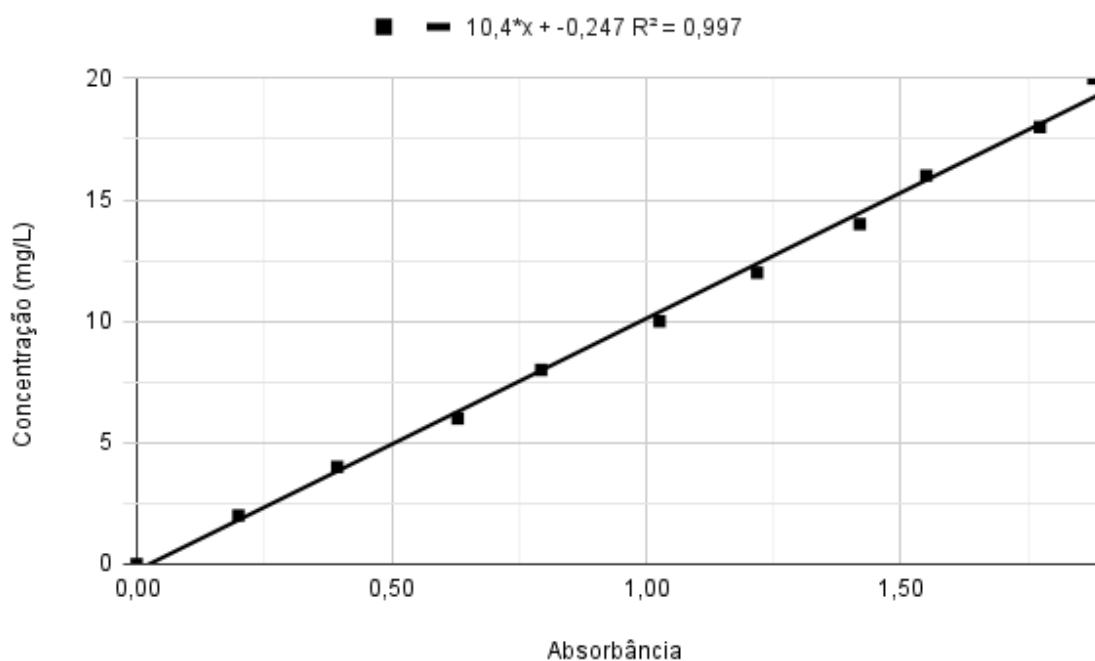


Fonte: Autoria própria.

Os testes foram realizados com 10 ml de uma solução de azul de metileno hidratado (Neon) de 2 ppm a uma vazão de 0,5 ml/min, durante 20 minutos. As amostras na saída foram coletadas em apenas três tempos (5,5, 11 e 16,5 min), devido às limitações no aparato experimental, para avaliar o comportamento da eficiência dos meios filtrantes. As condições

dos testes foram determinadas com base no estudo de Alvarenga e Correa (2021) e ajustadas experimentalmente. Para calcular a concentração do corante nas amostras foi utilizado um espectrofotômetro UV/ VIS (AZ Labor, Modelo GTA-97) operando no comprimento de onda de 665 nm para medir as absorvâncias. Uma curva de calibração foi construída para realizar as conversões, variando a concentração das soluções de azul de metileno de 0 a 20 ppm. O gráfico obtido e a equação que calcula a concentração a partir da absorvância são apresentados na Figura 3.3.

Figura 3.3. Curva de calibração e equação para cálculo da concentração de azul de metileno a partir da absorvância.



Fonte: Autoria própria.

As eficiências foram calculadas por meio da concentração de azul de metileno em água antes e depois do filtro. Para isso, avaliou-se tanto as concentrações de corante na saída do filtro em cada tempo de coleta quanto as eficiências médias de cada meio filtrante obtidas considerando os três tempos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Tratamento e Caracterização das Cinzas

Inicialmente, as CBCA foram submetidas a um processo de moagem, por meio de um moinho de bolas, a fim de promover a cominuição do material e obter partículas finas. Após a moagem o material foi peneirado e os resultados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Resultados do peneiramento das cinzas após a moagem.

Amostra	Mesh	Abertura (mm)	Massa de CBCA Retida (g)
1	115	0,125	8
2	170	0,088	18
3	200	0,074	24
4	250	0,062	10
5	270	0,053	10
6	400	0,037	0

Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado na Tabela 4.1.1, as peneiras de Mesh 170, 200, 250 e 270 (amostras 2, 3, 4 e 5) obtiveram uma quantidade de massa retida maior do que as outras. Por isso, os métodos de caracterização foram feitos utilizando essas amostras. Após a moagem e peneiramento, as amostras foram submetidas à análise no equipamento Malvern Mastersizer e os diâmetros obtidos são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resultados da análise Malvern Mastersizer.

Amostra	D(v0,1) (μm)	D(v0,5) (μm)	D(v0,9) (μm)	D(4,3) (μm)	D(3,2) (μm)
2	0,15	1,51	29,10	10,28	0,48
3	0,15	1,12	13,12	4,81	0,44
4	0,19	6,89	151,02	42,33	0,69
5	0,16	2,16	30,17	10,12	0,51

Fonte: Autoria própria.

Percebe-se que há diferentes diâmetros de partículas no material. Com relação ao diâmetro mediano $D(v_{0,5})$, os valores obtidos para as amostras 2, 3 e 5 são mais favoráveis para a incorporação das partículas nas nanofibras e coerentes com a literatura (Zhang *et al.*, 2020; Ge; Yoon; Choi, 2018; Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015). No entanto, o diâmetro de Sauter $D(3,2)$ é mais assertivo para se determinar o diâmetro mediano de partículas, já que ele considera parâmetros que caracterizam a amostra com relação a sua forma, levando em consideração a relação volume/área de superfície da partícula de interesse. Como os valores de $D(3,2)$ obtidos são bem próximos, pode-se dizer que todas as amostras possuem diâmetros semelhantes para a aplicação desejada. Os gráficos de distribuição de diâmetro da partícula obtidos a partir da análise Malvern Mastersizer podem ser consultados nos Apêndices.

Em seguida, as amostras foram caracterizadas com relação à densidade e área superficial, por meio da picnometria com gás Hélio e teste BET com adsorção de nitrogênio, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Densidade e área superficial das amostras de CBCA.

Amostra	Densidade (g/cm³)	Área Superficial (m²/g)
2	2,34	95,40
3	2,38	88,40
4	2,43	63,20
5	2,48	51,40

Fonte: Autoria própria.

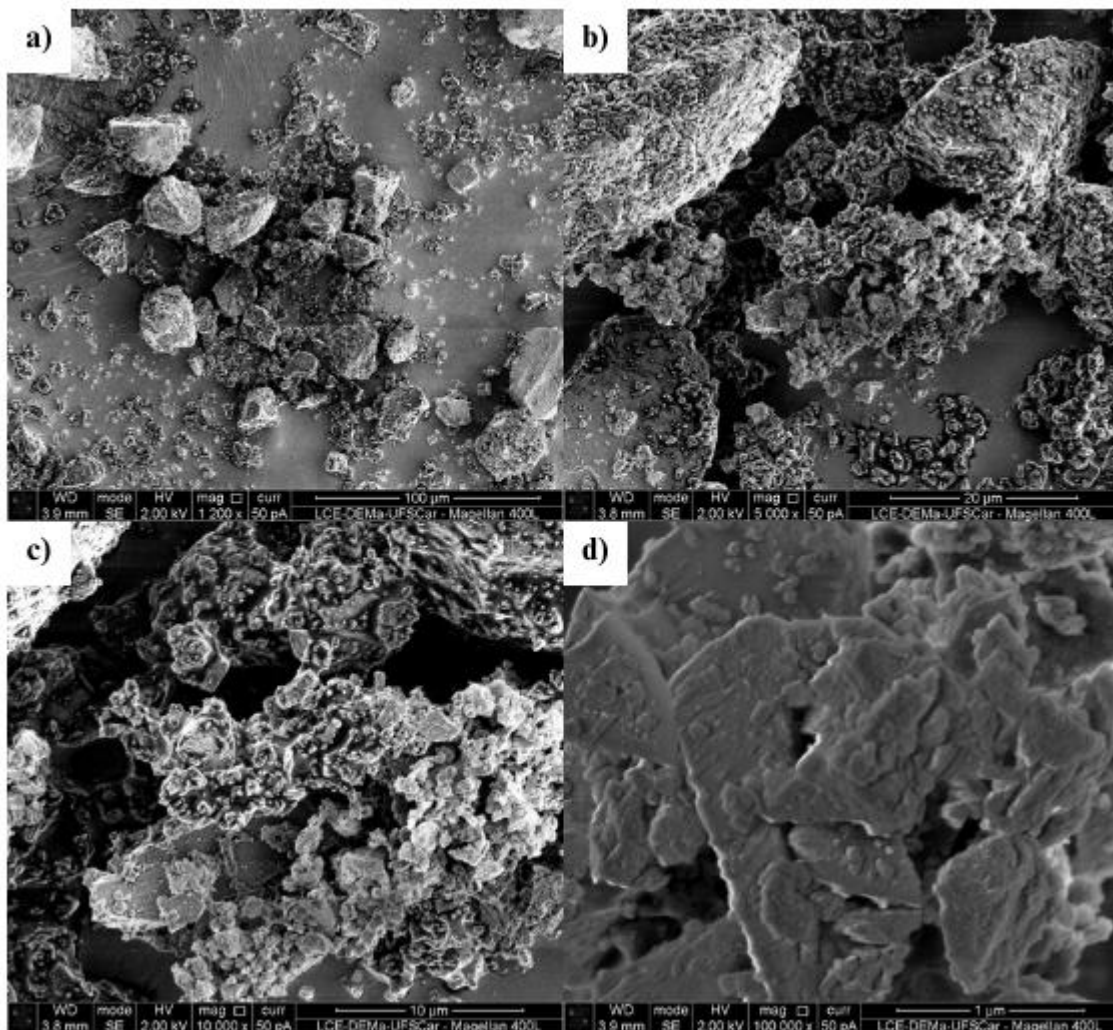
Nota-se que as densidades obtidas apresentam valores próximos. Já com relação às áreas superficiais, observa-se um aumento deste parâmetro com a diminuição da densidade. Ao fazer uma comparação dos resultados com trabalhos que caracterizaram as cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, concluiu-se que os valores de densidade estão em concordância com a literatura, já que a faixa para esse parâmetro é de 1,7 a 2,5 g/cm³ (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2020; Minnu; Bahurudeen; Athira, 2021). Já para área superficial, os resultados obtidos são inferiores aos reportados, os quais são de 100,68 m²/g (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015) e 249,66 m²/g (Alvarenga; Correa, 2021).

É importante destacar que tratamentos químicos podem aumentar a área superficial das cinzas e aumentar a eficiência de adsorção (Alvarenga; Correa, 2021; Alvarenga *et al.*, 2023). No entanto, é importante que elas estejam adequadamente incorporadas às fibras para a

aplicação como meios filtrantes. Para a produção dos meios filtrantes, decidiu-se utilizar as cinzas da amostra 2, já que apresentaram a maior área superficial dentre as amostras.

Com relação à morfologia das partículas, as imagens geradas pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) são mostradas na Figura 4.1 com diferentes escalas de ampliação.

Figura 4.1. Imagens das cinzas geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura em diferentes ampliações: a) 1200 x, b) 5000 x, c) 10000 x e d) 100000 x.



Fonte: Autoria própria.

É possível observar na Figura 4.1 que as partículas que constituem as cinzas apresentam forma irregular, diferentes dimensões e diversos poros, os quais podem ser responsáveis por uma elevada área superficial e capacidade adsorvente do material.

Os resultados dos testes de composição da fuligem são apresentados na Tabela 4.4, que contém os resultados das análises de Fluorescência de Raio X (FRX) e Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS).

Tabela 4.4 Resultados da Fluorescência de Raio X (FRX) e da Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS).

FRX		EDS	
Elemento	Resultado (%)	Elemento	Resultado (%)
Si	80,77	O	33,18
Fe	4,75	Si	32,87
K	4,29	C	31,55
Ca	3,63	Ni	1,60
Al	2,95	Al	0,38
Ti	1,12	Ca	0,34
P	1,01	Mg	0,09

Fonte: Autoria própria.

Como visto na Tabela 4.4, os valores das porcentagens dos elementos são diferentes dependendo do método analítico, devido aos diferentes elementos possíveis de detecção obtidos pelas técnicas utilizadas. As cinzas apresentam cerca de 30% de carbono, o que sugere a presença de matéria orgânica restante da queima do bagaço, que se mantiveram, já que a fuligem utilizada não sofreu tratamento térmico ou químico. Pode-se verificar que 70% do material é inorgânico, composto principalmente por óxidos. Em ambos os testes, o silício apareceu em grandes porcentagens, indicando a alta presença deste óxido no material, como era esperado (Rodríguez-Díaz *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2020; Alvarenga; Correa, 2021). Assim, com a confirmação da presença de óxidos nas cinzas, as interações com moléculas alvos da adsorção ocorrem e o poder de adsorção do material é favorecido.

4.2 Incorporação das CBCA

Primeiramente, os meios filtrantes eletrofiados por 1 hora foram submetidos à análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), juntamente com o teste de Espectrometria de

Energia Dispersiva (EDS). Assim, foi possível observar a morfologia das fibras e avaliar sua composição química para averiguar os efeitos da incorporação das CBCA. A Tabela 4.5 apresenta as medidas dos diâmetros médios das nanofibras e na Figura 4.2, é possível vê-las.

Tabela 4.5. Tamanho do diâmetro médio das nanofibras.

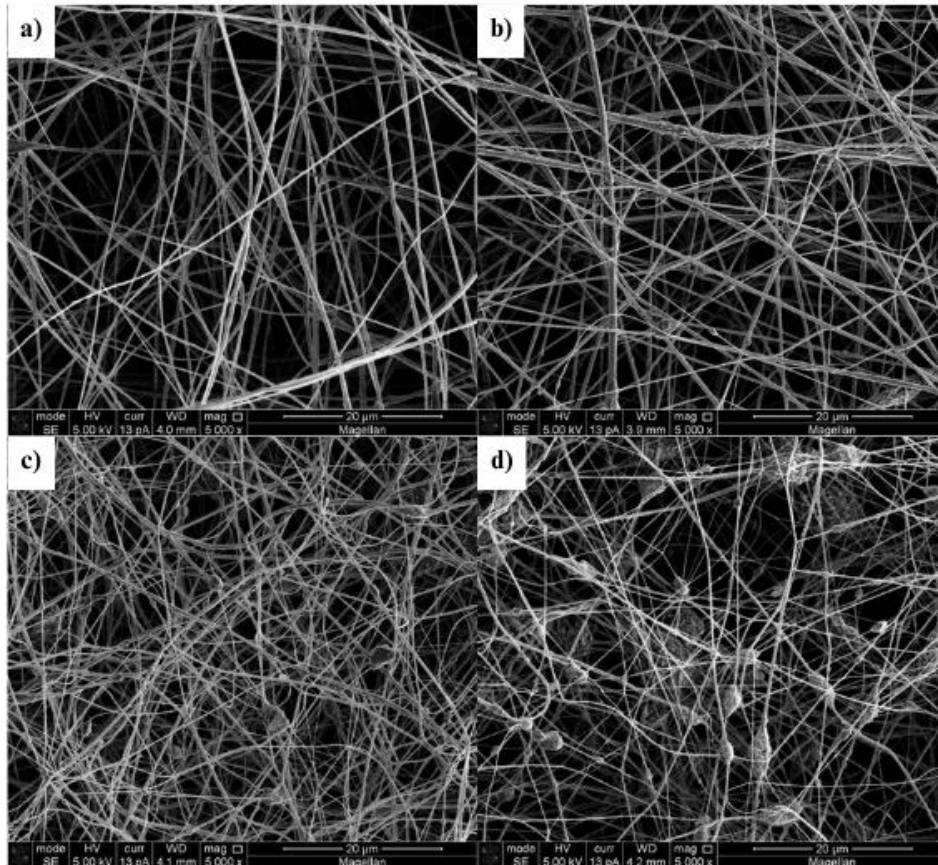
Amostra	Diâmetro médio (nm)
Sem CBCA	428±146,67
185 mg	326±41,42
500 mg	149±40,35
1000 mg	121±40,30

Fonte: Autoria própria.

Observou-se a diminuição das fibras à medida que a massa de CBCA adicionada aumentou (Park *et al.*, 2022). Além disso, nota-se a presença de diversos grânulos, que podem ser partículas de CBCA ou *beads*, formados por gotas de polímeros. Mesmo sendo considerado um defeito, os *beads* também podem apresentar possíveis utilidades em diferentes aplicações (Xue *et al.*, 2019). A variação dos diâmetros das fibras com a incorporação de CBCA pode ser atribuído a alterações nas propriedades físicas das soluções polimérica e à própria existência de partículas com diferentes diâmetros que podem ocasionar a formação de *beads* nas estruturas das fibras.

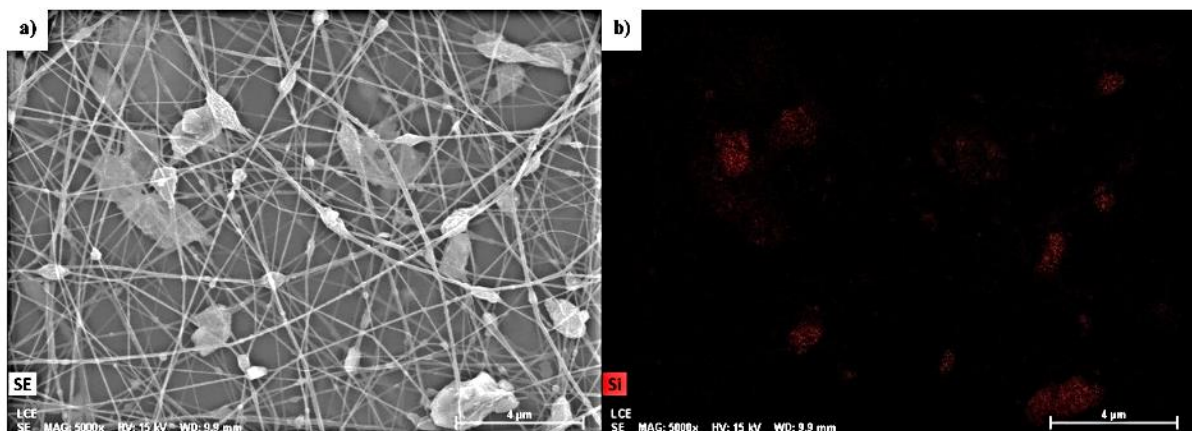
Como pode ser visto na Figura 4.3, que apresenta o EDS do meio filtrante contendo 1000 mg de CBCA e o mapeamento de Silício, conclui-se que as CBCA foram incorporadas às fibras, pela identificação do elemento. Mesmo as nanofibras apresentando grânulos, pode-se observar que o elemento Silício, um dos principais constituintes da fuligem, foi identificado ao longo das nanofibras, apresentando maior concentração nos grânulos. Também pode-se concluir, pela análise visual das imagens, que os grânulos maiores, com morfologia irregular e menos esférica, correspondem às partículas ou aglomerados de partículas de cinzas.

Figura 4.2. Imagens dos meios filtrantes geradas por Microscopia Eletrônica de Varredura em ampliação 5000 x: a) Sem CBCA, b) 185 mg de CBCA, c) 500 mg de CBCA e d) 1000 mg de CBCA.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.3. MEV do meio filtrante com 1000 mg de CBCA (a) com mapeamento de Silício (b).



Fonte: Autoria própria.

4.3 Coleta de Nanopartículas do Ar

Os meios filtrantes foram avaliados quanto ao seu desempenho na filtração de nanopartículas dispersas em ar. A Tabela 4.6 mostra a média das concentrações em massa e número de nanopartículas, diâmetro mediano, diâmetro médio e desvio padrão geométrico (σ) da distribuição de tamanho de nanopartículas obtidas na entrada dos filtros produzidos em 1 h de eletrofiliação. Já a Tabela 4.7 apresenta os mesmos dados para os filtros produzidos em 6 h.

Tabela 4.6. Valores de concentração mássica e por número de nanopartículas e diâmetros mediano, médio e desvio padrão geométrico da distribuição de tamanho na entrada dos filtros produzidos em 1 h de eletrofiliação.

Parâmetro	Massa	Número de partículas
Concentração mássica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34,83 \pm 3,24	-
Concentração em número de partículas (partículas/ cm^3)	-	165878,58 \pm 14485,99
Mediana (nm)	89,43 \pm 2,02	37,03 \pm 0,76
Média (nm)	99,96 \pm 1,48	42,98 \pm 0,90
Desvio padrão (σ)	1,69 \pm 0,01	1,66 \pm 0,01

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.7. Valores de concentração mássica e por número de nanopartículas e diâmetros mediano, médio e desvio padrão geométrico da distribuição de tamanho na entrada dos filtros produzidos em 6 h de eletrofiliação.

Parâmetro	Massa	Número de partículas
Concentração mássica ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	50,09 \pm 7,98	-
Concentração em número de partículas (partículas/ cm^3)	-	303226,17 \pm 19036,26
Mediana (nm)	78,67 \pm 3,16	35,40 \pm 1,05
Média (nm)	88,77 \pm 3,05	40,45 \pm 1,16
Desvio padrão (σ)	1,67 \pm 0,01	1,62 \pm 0,02

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4.8 mostra a eficiência global de coleta de nanopartículas e queda de pressão dos meios filtrantes produzidos e do suporte utilizado como substrato. As eficiências globais e as quedas de pressão foram medidas a uma vazão de 1,5 L/min de ar contendo nanopartículas de NaCl.

Tabela 4.8. Eficiência global, queda de pressão e fator de qualidade dos meios filtrantes produzidos na coleta de nanopartículas do ar.

Meio filtrante	Tempo de Eletrofiação					
	1h			6h		
	Eficiência Global (%)	Queda de Pressão (Pa)	Fator de Qualidade (Pa ⁻¹)	Eficiência Global (%)	Queda de Pressão (Pa)	Fator de Qualidade (Pa ⁻¹)
Sem CBCA	90,24±6,89	53,50±1,41	0,0435	99,69±0,41	380,35±2,19	0,0152
185 mg de CBCA	63,67±14,38	17,20±0,00	0,0589	99,58±0,56	304,60±8,91	0,0180
500 mg de CBCA	63,66±9,77	22,10±0,42	0,0458	99,75±0,32	366,15±12,09	0,0164
1000 mg de CBCA	16,16±13,07	11,15±0,07	0,0158	99,69±0,40	276,60±5,37	0,0209
Suporte	0,12±0,00	0,10±0,00				

Fonte: Autoria própria.

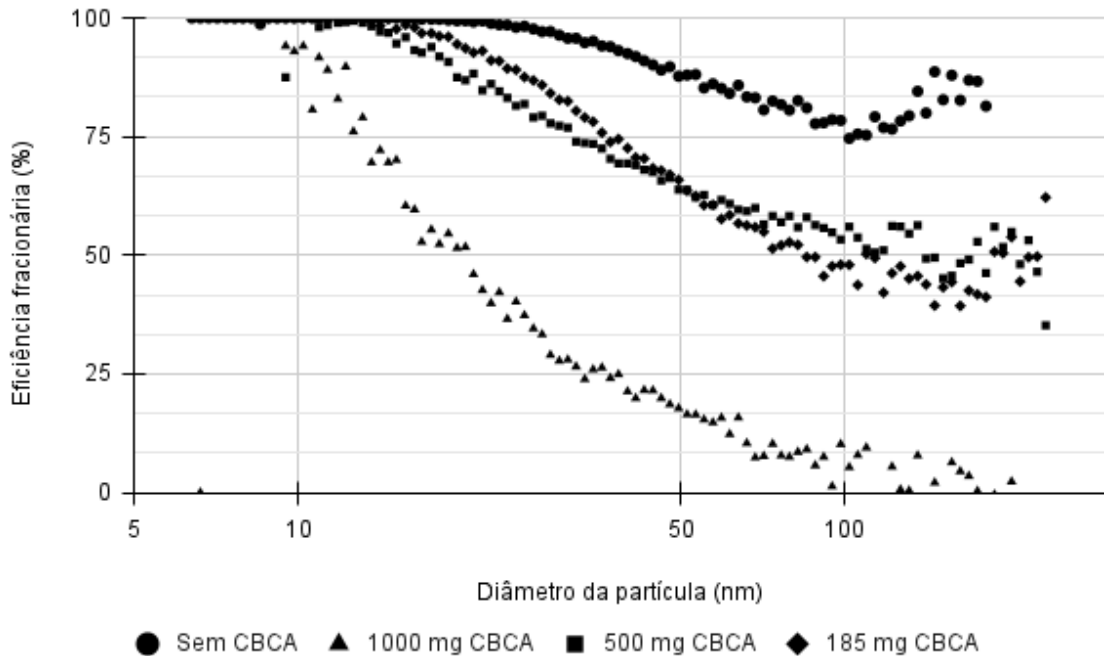
Observando a Tabela 4.8, os resultados de eficiência e queda de pressão para o suporte utilizado foram muito pequenos e, portanto, o seu efeito na eficiência de coleta dos filtros pode ser desprezado. Assim, pode-se verificar que a deposição de nanofibras no substrato (suporte) favoreceu a coleta de nanopartículas. Para as fibras eletrofiadas por 1 h, observou-se que a adição de CBCA reduziu a eficiência global de filtração em cerca de 25 % para 185 mg e 500 mg, e em 75% para 1000 mg. Já com relação à queda de pressão, a adição de CBCA provocou uma diminuição nos valores obtidos para os filtros, sendo cerca de 36% para 185 mg, de 31% para 500 mg e de 42% para 1000 mg. Para as fibras eletrofiadas por 6 h, a eficiência global de coleta foi de, aproximadamente, 100% para todos os meios filtrantes e os valores de queda de pressão aumentaram significativamente em comparação aos de 1 h, devido ao aumento da sobreposição das fibras e, conseqüentemente, da espessura do meio com o aumento do tempo de eletrofiação. Porém, é possível observar a mesma tendência de diminuição da queda de

pressão com o aumento de cinzas adicionadas nas fibras, sendo cerca de 20% para 185 mg, de 4% para 500 mg e de 27% para 1000 mg.

Analisando os fatores de qualidade, pode-se concluir que o meio filtrante produzido com 185 mg de CBCA e 1 h de eletrofição obteve o melhor resultado dentre as amostras, 0,0589 Pa⁻¹, o que pode estar relacionado à sua baixa queda de pressão. É interessante observar que os meios filtrantes com as maiores eficiências obtiveram fatores de qualidade mais baixos, já que os seus valores de queda de pressão são maiores. Porém, os fatores de qualidade obtidos estão de acordo com estudos semelhantes, em que a faixa é entre 0,01 e 0,09 Pa⁻¹ (Bonfim et al., 2021; Lima, 2025; Kim et al., 2021; WANG et al., 2014).

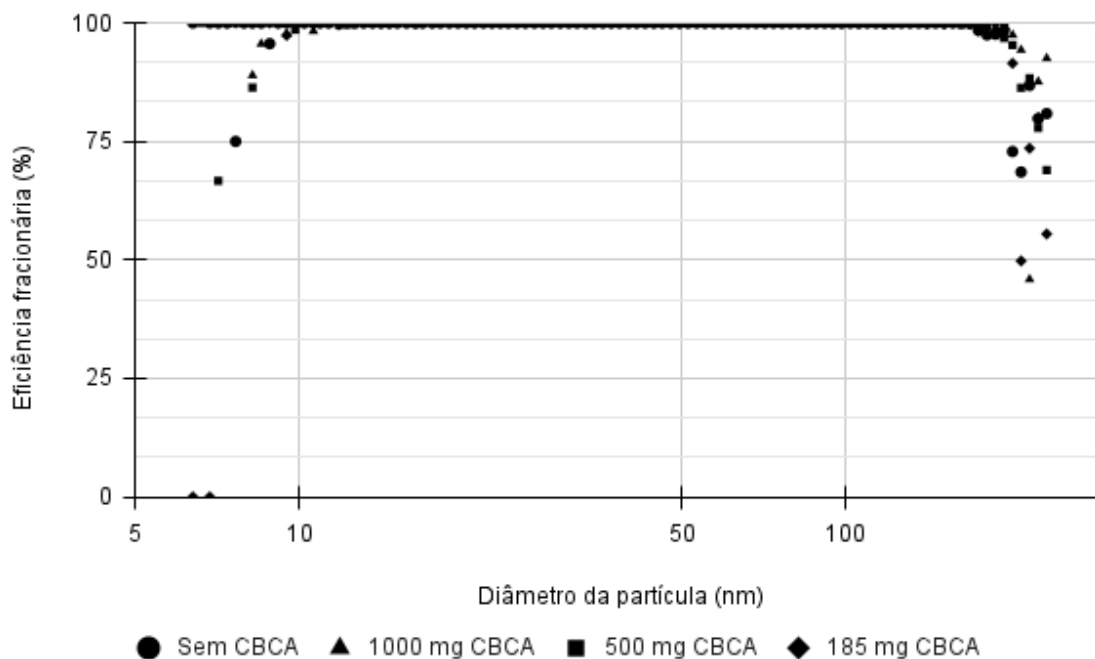
Além das eficiências globais, as eficiências fracionárias dos meios filtros também foram obtidas. A Figura 4.4 apresenta as eficiências fracionárias dos meios filtrantes para as diferentes concentrações de cinzas incorporadas às fibras e tempo de eletrofição de 1 h. A Figura 4.5 mostra as curvas de eficiência fracionária para os meios filtrantes produzidos com 6 h de eletrofição.

Figura 4.4. Eficiência fracionária para os meios filtrantes eletrofiados por 1 h.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.5. Eficiência fracionária para os meios filtrantes eletrofiados por 6 h.



Fonte: Autoria própria.

Como pode ser visto na Figura 4.4, os meios filtrantes com 1 h de eletrofiação apresentam um comportamento de queda de eficiência com o aumento do diâmetro da partícula, que é intensificado à medida que a massa de CBCA incorporada aumenta. Observa-se que, para o filtro sem CBCA, a menor eficiência obtida foi de 75% para o diâmetro de 100 nm, já para os filtros com 500 mg e 185 mg de CBCA, as menores eficiências obtidas estão entre 30 e 40% para diâmetros superiores a 100 nm, enquanto para o filtro de 1000 mg a eficiência é zerada próximo a esse diâmetro. As características do meio filtrante (como diâmetro da fibra e porosidade) e condições operacionais da filtração (como distribuição de tamanho de partículas e velocidade do ar) influenciam as eficiências devido aos diferentes mecanismos de coleta de partículas atuantes na filtração. Nessa faixa de diâmetro de partículas os mecanismos de coleta predominantes são o difusional e a interceptação direta. A literatura indica um ponto de mínimo na eficiência de coleta na faixa de diâmetro de partículas entre 0,1 mm e 1 mm, que ocorreu devido à alteração da predominância do mecanismo difusional para o de interceptação direta.

Pela análise da Figura 4.5, pode-se observar que no intervalo de diâmetro de 10 a 200 nm as eficiências são na faixa de 100%. Neste caso, a variação de massa de CBCA incorporada não afetou de forma tão significativa as eficiências observadas.

Os resultados de baixa eficiência e baixa queda de pressão dos meios filtrantes com menor tempo de eletrofiação podem estar relacionados à diminuição do diâmetro médio das nanofibras com o aumento da porcentagem de CBCA (Russo *et al.*, 2022). Com o aumento do tempo do *electrospinning*, foi possível melhorar o desempenho dos filtros, devido à maior sobreposição das fibras que ocasionou maior empacotamento das fibras, aumento de espessura da membrana e redução da porosidade.

Os valores de queda de pressão ficaram dentro da faixa para aplicação em filtração de ar (Bortolassi *et al.*, 2019a; Bortolassi *et al.*, 2019b; De Oliveira; Aguiar; Guerra, 2020; Bonfim *et al.*, 2021). Já os valores de eficiência de coleta para partículas nanométricas ficaram abaixo dos encontrados na literatura para os meios produzidos em 1 h (Bortolassi *et al.*, 2019; De Oliveira; Aguiar; Guerra, 2020; Bonfim *et al.*, 2021), principalmente com a incorporação da CBCA. Após a otimização do processo, ou seja, com 6 h de fiação, os valores de eficiência aumentaram, correspondendo ao esperado.

A permeabilidade dos filtros foi analisada nas condições do teste de coleta de nanopartículas do ar. Os valores obtidos para a constante de permeabilidade k_1 são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9. Constantes de permeabilidade k_1 dos meios filtrantes.

Meio Filtrante	k_1 (m ²)	
	1 h	6 h
Sem CBCA	5,05E ⁻¹²	1,11E ⁻¹²
185 mg de CBCA	1,64E ⁻¹¹	1,07E ⁻¹²
500 mg de CBCA	1,31E ⁻¹¹	8,73E ⁻¹³
1000 mg de CBCA	2,57E ⁻¹¹	1,23E ⁻¹²

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 4.9 pode-se observar que a permeabilidade dos filtros eletrofiados por 1 h é maior do que a dos eletrofiados por 6 h, o que era esperado, dado que a queda de pressão no segundo grupo é bem maior do que no primeiro, ou seja, o ar passa com mais facilidade nesses meios filtrantes.

De modo geral, pode-se concluir que os filtros produzidos em 6 h de eletrofiliação obtiveram melhor desempenho na coleta de nanopartículas do ar e a adição de cinzas trouxe vantagens com relação à diminuição da queda de pressão.

4.4 Adsorção de Azul de Metileno da Água

Os meios filtrantes também foram avaliados com relação à sua eficiência no tratamento de água, com foco na adsorção do corante azul de metileno. Para avaliar o comportamento da adsorção ao longo do tempo, foram coletadas três amostras em cada teste, considerando os tempos de 5,5; 11 e 16,5 min. A Tabela 4.10 apresenta as concentrações de azul de metileno na saída do filtro em cada tempo de coleta, para cada meio filtrante produzido.

Tabela 4.10. Concentração de azul de metileno (mg/L) na saída dos filtros para três tempos diferentes de coleta.

Meio Filtrante	Tempo (min)	Concentração na Saída (mg/L)	
		1 h	6 h
Sem CBCA	5,5	0,44±0,02	0,00±0,00
	11	0,75±0,01	0,02±0,02
	16,5	0,55±0,04	0,48±0,0,02
185 mg de CBCA	5,5	0,56±0,02	0,00±0,00
	11	0,83±0,01	0,00±0,00
	16,5	1,04±0,05	0,01±0,01
500 mg de CBCA	5,5	0,62±0,02	0,00±0,00
	11	1,04±0,01	0,00±0,00
	16,5	1,01±0,02	0,00±0,00
1000 mg de CBCA	5,5	0,65±0,01	0,52±0,22
	11	1,03±0,01	0,58±0,10
	16,5	1,10±0,02	0,72±0,37

Fonte: Autoria própria.

É possível observar que as maiores concentrações de saída de azul de metileno foram obtidas para o tempo de 16,5 min de filtração, tanto para os meios filtrantes eletrofiados em 1 h quanto para os de 6 h, tal comportamento ocorre devido à saturação do meio na adsorção desse corante com o tempo. No entanto, os valores de concentração obtidos no segundo conjunto de dados é bem menor do que no primeiro, o que indica que os meios filtrantes produzidos em 6 h possuem maior eficiência na remoção. Assim, as eficiências médias, considerando os tempos, foram obtidas para cada meio filtrante e são apresentadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11. Eficiência média dos meios filtrantes produzidos na adsorção de azul de metileno.

Meio Filtrante	Eficiência Média (%)	
	1 h	6 h
Sem CBCA	69,88±0,08	89,59±0,17
185 mg de CBCA	49,61±0,15	99,73±0,00
500 mg de CBCA	44,44±0,15	100,00±0,00
1000 mg de CBCA	42,28±0,15	62,09±0,07

Fonte: Autoria própria.

A partir dos dados, pode-se observar que os meios filtrantes eletrofiados por 6 h apresentaram maiores eficiências na adsorção de azul de metileno, devido à sobreposição das nanofibras e aumento da espessura da membrana. Além disso, os resultados dos meios filtrantes com 185 mg de CBCA e 500 mg de CBCA indicam que o aumento da eficiência pode estar relacionado ao caráter adsorvente das cinzas e sua incorporação na superfície das fibras, permitindo a interação entre os poros do material e o corante alvo da adsorção. Comparando os resultados com o trabalho de Alvarenga e Correa (2021), em que o aumento da massa de cinzas indicou o aumento da eficiência, pode-se concluir que a eficiência média dos meios filtrantes produzidos foi coerente, com exceção do meio com 1000 mg de CBCA, que teve uma baixa eficiência, o que pode ser justificado, mais uma vez, pela alteração das características morfológicas e estruturais das fibras com o aumento da quantidade de material particulado acrescentado (Russo *et al.*, 2022). Os meios filtrantes sem adição de cinzas também

apresentaram eficiências interessantes, o que pode ser atribuído às diferenças nas características das fibras produzidas na ausência das partículas de fuligem.

Vele ressaltar que há diferenças entre o presente trabalho e o estudo de Alvarenga e Correa (2021), como é indicado na Tabela 4.12.

Tabela 4.12. Comparação das condições adotadas entre o presente trabalho e estudo de Alvarenga e Correa (2021).

	Presente Trabalho	Alvarenga e Correa (2021)
Método de incorporação	Adição na solução polimérica	Deposição na superfície das fibras
Massa de CBCA (mg)	185 – 1000	3 – 20
Concentração da solução de azul de metileno (ppm)	2	5
Vazão da solução de azul de metileno nos testes de adsorção (ml/min)	0,5	0,6 – 1,5

Fonte: Autoria própria.

A principal delas é com relação ao método de incorporação das cinzas, já que o estudo de Alvarenga e Correa (2021) utiliza a deposição do material na superfície das fibras, enquanto o presente estudo incorpora o material na solução polimérica para eletrofição. Por isso, também há uma diferença na variação da massa de cinzas adicionadas às fibras: enquanto o primeiro adotou a faixa de 185 a 1000 mg, o segundo adotou de 3 a 20 mg.

Sobre os testes de adsorção, as condições precisaram ser ajustadas devido às limitações experimentais. Neste trabalho foi utilizado 10 ml de uma solução de azul de metileno de 2 ppm a uma vazão de 0,5 ml/min e em Alvarenga e Correa (2021), 10 ml de uma solução de azul de metileno de 5 ppm a uma vazão que variou de 0,6 a 1,5 ml/min. Além disso, o trabalho de Alvarenga e Correa (2021) investigou o efeito da ativação em uma amostra de cinzas, submetendo-a a uma atmosfera de CO₂ a 800°C, e comparou com uma amostra sem ativação, demonstrando um aumento de 86% na adsorção de azul de metileno em um teste batelada.

5. CONCLUSÃO

A partir do presente trabalho, verificou-se a possibilidade de incorporação das cinzas de bagaço de cana-de-açúcar em meios filtrantes produzidos com nanofibras de acetato de celulose por meio da técnica de eletrofiação. A caracterização das cinzas mostrou que as partículas possuem diâmetros medianos na faixa de 1,12 a 6,89 micrômetros e área superficial entre 51,40 e 95,40 m²/g. Além disso, os testes de composição demonstraram que o material possui alta presença de silício. Essas características se mostraram coerentes com a literatura e indicam o potencial adsorvente do material utilizado.

Os meios filtrantes foram produzidos e a incorporação de CBCA foi bem-sucedida, dada a identificação do elemento Silício nas nanofibras. De acordo com os resultados, concluiu-se que o aumento da massa de cinzas incorporadas provocou a diminuição da eficiência da filtração, de 90,24% para 16,16%, e da queda de pressão, de 53,50 Pa para 11,15 Pa, na coleta de nanopartículas do ar para os meios filtrantes produzidos em 1h. Para a adsorção de azul de metileno, os meios filtrantes produzidos em 1h apresentaram o mesmo comportamento, em que o aumento da massa de cinzas incorporadas diminuiu os valores de eficiência obtidos, de 69,88% para 42,28%. Isso pode estar atrelado ao fato de a adição das cinzas à solução polimérica alterar as características da eletrofiação e das nanofibras geradas, ocasionando a produção de fibras mais finas e meios filtrantes mais porosos.

Dessa forma, a otimização do processo de eletrofiação foi feita, aumentando o tempo de de 1 h para 6 h. A partir disso, as eficiências dos meios filtrantes aumentaram significativamente para a coleta de nanopartículas do ar, atingindo valores próximos a 100%. A queda de pressão dos meios filtrantes também aumentou, devido ao maior empacotamento das fibras, mas ficou dentro dos parâmetros esperados para a aplicação desejada, entre 276,60 Pa e 380,35 Pa. Os fatores de qualidade obtidos após a otimização, apesar de serem menores, são coerentes com resultados de estudos semelhantes, entre 0,01 e 0,02 Pa⁻¹. Com relação ao processo de adsorção, os meios filtrantes também apresentaram melhor desempenho após a otimização, especialmente os com 185 mg e 500 mg de CBCA, atingindo eficiências de 99,7% e 100%, respectivamente.

Como sugestão para futuros trabalhos está a realização de um planejamento experimental para a produção de meios filtrantes com a incorporação de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, a fim de determinar estatisticamente a influência dos parâmetros no desempenho de filtração e adsorção. Além disso, outra sugestão é verificar se a utilização de

tratamentos químicos e/ou térmicos nas cinzas apresenta uma melhora significativa na eficiência de adsorção dos filtros, já que isso foi relatado em estudos da área (Alvarenga; Correa, 2021).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, B.W.; CHI, Y.S.; KANG, T.J.; Preparation and characterization of multi-walled carbon nanotube/poly(ethylene terephthalate) nanoweb. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 110, 2008, p. 4055-4063.

ALVARENGA, A. D. CORREA, D. S. Composite nanofibers membranes produced by solution blow spinning modified with CO₂-activated sugarcane bagasse fly ash for eficiente removal of water pollutants. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, 2021, 125376.

ALVARENGA, A. D.; FACURE, M. H. M.; SÁNCHEZ-MONTES, I.; OLIVEIRA, G. O. S.; LANZA, M. R. V.; MERCANTE, L. A.; CORREA, D. S. Multifunctional and sustainable soot-modified nanofibrous membrane for adsorption, sensing and hydrogen peroxide electrogeneration. **Journal of Cleaner Production**, v. 422, 2023, 138697.

BONFIM, D. P. F.; CRUZ, F. G. S.; BRETAS, R. E. S.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. A Sustainable Recycling Alternative: Electrospun PET-Membranes for Air Nanofiltration. **Polymers**, v. 13, 2021, p. 1166.

BORTOLASSI, A. C. C. Desenvolvimento e avaliação de meios filtrantes com nanofibras eletrofiadas e agentes bactericidas aplicados na filtração de ar. Tese de doutorado – Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2019.

BORTOLASSI, A. C. C.; NAGARAJAN, S.; DE ARAÚJO LIMA, B.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L.; HUON, V.; SOUSSAN, L.; CORNU, D.; MIELE, P.; BECHELANY, M. Efficient nanoparticles removal and bactericidal action of electrospun nanofibers membranes for air filtration. **Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications**, v. 102, 2019a, p. 718-729.

BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L.; SOUSSAN, L.; CORNU, D.; MIELE, P.; BECHELANY, M. Composites Based on Nanoparticle and Pan Electrospun Nanofiber Membranes for Air Filtration and Bacterial Removal. **Nanomaterials**, 2019b, v. 9, p. 1740.

BORTOLASSI, A. C. C. **Desenvolvimento e avaliação de meios filtrantes com nanofibras eletrofiadas e agentes bactericidas aplicados na filtração de ar**. São Carlos, 2019 Tese (Engenharia química) - Universidade Federal de São Carlos.

CONAB. **Boletim da Safra da Cana-de-Açúcar**. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras>. Acesso em: 13 mai. 2025.

CRINI, G.; LICHTFOUSE, E. Advantages and disadvantages of techniques used for wastewater treatment. **Environmental chemistry letters**, 17, 145–155, 2019.

DA SILVA, E. R. A. **Os objetivos do desenvolvimento sustentável e os desafios da nação**. 2018.

DE OLIVEIRA, A. E.; AGUIAR, M. L.; GUERRA, V. G. Improved filter media with PVA/citric acid/Triton X-100 nanofibers for filtration of nanoparticles from air. **Polymer Bulletin**, v. 78, p. 6387-6408, 23 out 2020.

DORMAN, R. G. **Dust Control and Air Cleaning**: International Series of Monographs in Heating, Ventilation and Refrigeration. Elsevier, v. 1, f. 322, 2014. 643 p.

DRIEMEIER, C.; OLIVEIRA, M. M.; MENDES, F. M.; GÓMEZ, E. O. Characterization of sugarcane bagasse powders. **Powder Technology**, v. 214, p. 111-116, 25 nov 2011.

DULLIEN, F. A. L. **Introduction to Industrial Gas Cleaning**. San Diego; Toronto: Academic Press, f. 156, 1988. 312 p.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Relatório Síntese 2024**: Ano Base 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-715/BEN_S%C3%ADntese_2024_PT.pdf. Acesso em: 14 mai. 2025.

ESMERYAN, K. D.; CHAUSHEV, T. A. Anti-biofouling potential of extremely water-repellent carbon soot coatings immersed in a highly-contaminated seawater swamp. **Progress in Organic Coatings**, v. 183, out 2023.

Federação e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo (Org.). **AMPLIAÇÃO DA OFERTA DE ENERGIA ATRAVÉS DA BIOMASSA**. 2001. 90 p. Disponível em: <https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4505>. Acesso em: 12 mai. 2025.

GE, J. C.; YOON, S. K.; CHOI, N. J. Application of Fly Ash as an Adsorbent for Removal of Air and Water Pollutants. **Applied Sciences**, v. 8, 10 jul 2018.

GOMES, M. F.; FERREIRA, L. J. Políticas públicas e os objetivos do desenvolvimento sustentável. *In*: DIREITO e Desenvolvimento, v. 9. 2018, p. 155-178.

IPIRANGA, A. S. R.; GODOY, A. S.; BRUNSTEIN, J. Introdução. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 12, n. 3, 2011.

KATHERESAN, V.; KANSEDO, J.; LAU, S. Y. Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: a review. **Journal of environmental chemical engineering**, 6(4), 4676–4697, 2018.

KIM, H. J.; PANT, H. R.; CHOI, N. J.; KIM, C. S. Composite electrospun fly ash/polyurethane fibers for absorption of volatile organic compounds from air. **Chemical Engineering Journal**, Kathmandu, v. 230, 2013, p. 244-250.

KIM, H. J.; PANT, H. R.; KIM, J. H.; CHOI, N. J.; KIM, C. S. Fabrication of multifunctional TiO₂-fly ash/polyurethane nanocomposite membrane via electrospinning. **Ceramics International**, v. 40, 2014, p. 3023-3029.

Lima, Felipe de Aquino. **Meios filtrantes para ar de alta eficiência obtidos por eletrofição usando poliestireno expandido reciclado**. São Carlos, 2025 Tese (Engenharia química) - Universidade Federal de São Carlos.

LOH, Y.R.; SUJAN, D.; RAHMAN, M.E.; DAS, C.A. Sugarcane bagasse – The future composite material: A literature review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 75, 2013, p.14-22.

MINNU, S. N; BAHURUDEEN, A; ATHIRA, G. Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 28, 20 fev 2021.

NOVACANA. **As usinas de Açúcar e Etanol do Brasil**. 2025. Disponível em: https://www.novacana.com/usinas_brasil. Acesso em: 14 mai. 2025.

OBJETIVOS de Desenvolvimento Sustentável. Nações Unidas. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 15 mai. 2025.

OLIVEIRA, J. A.; CUNHA, F. A.; RUOTOLO, L. A. M. Synthesis of zeolite from sugarcane bagasse fly ash and its application as a low-cost adsorbent to remove heavy metals. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 956-963, 20 ago 2019.

PANT, B.; OJHA, G. P.; Kim, H.; PARK, M.; PARK, S. Fly-ash-incorporated electrospun zinc oxide nanofibers: Potential material for environmental remediation. **Environmental Pollution**, v. 245, 2019, p. 163-172.

PARK, M.; KUK, Y.-S; KWON, O. H.; ACHARYA, J.; OJHA, G.P.; KO, J.-K; KONG, H.-S.; PANT, B. Fly Ash Incorporated Polystyrene Nanofiber Membrane as a Fire Retardant Material: Valorization of Discarded Materials. **Nanomaterials**, v. 12, 2022, 3811.

PHAM, Q. P.; SHARMA, U.; MIKOS, A. G. Electrospinning of Polymeric Nanofibers for Tissue Engineering Applications: A Review. **Tissue Engineering**, v. 12, n. 5, 13 jun 2006.

PRAIPIPAT, P.; NGAMSURACH, P.; RATTANAVARU, M.; CHOOTHAI, N.; PHONGSA, A.; SAENGWIJIT, P. Synthesis and characterization of metal oxide doped

beaded sugarcane bagasse fly ash for direct red 28 dye removal. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, 2023.

PRAIPIPAT, P.; NGAMSURACH, P.; ROOPKHAN, N. Zeolite A powder and beads from sugarcane bagasse fly ash modified with iron(III) oxide-hydroxide for lead adsorption. **Scientific Reports**, v. 13, 01 fev 2023.

PÉREZ-GONZÁLEZ, G. L.; GÓMEZ-VILLARREAL, L. J.; SERRANO-MEDINA, A.; TORRES-MARTÍNEZ, E. J.; CORNEJO-BRAVO, J.M. Mucoadhesive Electrospun Nanofibers for Drug Delivery Systems: Applications of Polymers and the Parameters' Roles. **International Journal of Nanomedicine**, v. 14, 2019, 5271-5285.

RODRÍGUEZ-DÍAZ, J. M.; GARCÍA, J. O. P.; SÁNCHEZ, L. R. B.; DA SILVA, M. G. C.; DA SILVA, V. L.; ARTEAGA-PÉREZ, L. E. Comprehensive Characterization of Sugarcane Bagasse Ash for Its Use as an Adsorbent. **Bioenergy Research**, v. 8, n. 4, 2015, p. 1885-1895.

RUSSO, F.; CASTRO-MUNHOZ, R.; SANTORO, S.; GALIANO, F.; FIGOLI, A. A review on electrospun membranes for potential air filtration application. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, 2022, 108452.

SAUD, P. S.; PANT, B.; PARK, M.; CHAE, S.; PARK, S.; EI-NEWEHY, M.; AL-DEYAB, S.; KIM, H. Preparation and photocatalytic activity of fly ash incorporated TiO₂ nanofibers for effective removal of organic pollutants. **Ceramics International**, v. 41, 2015, p. 1771-1777.

SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**. John Wiley & Sons, v. 1, f. 335, 2006. 670 p.

SHALABY, T.; HAMAD, H.; IBRAHIM, E.; MAHMOUD, O.; AL-OUFY, A. Electrospun nanofibers hybrid composites membranes for highly efficient antibacterial activity. **Ecotoxicol. Environ. Saf.** 2018, 162, 354–364.

SHIRATSU, V. L. **Meios filtrantes do controle de poluição do ar em ambientes internos**: Uma revisão integrativa de novas tecnologias. São Carlos, 2021 Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia química) - Universidade Federal de São Carlos.

SPURNY, K. **Advances in aerosol filtration**. Florida: CRC Press LLC, 1998.

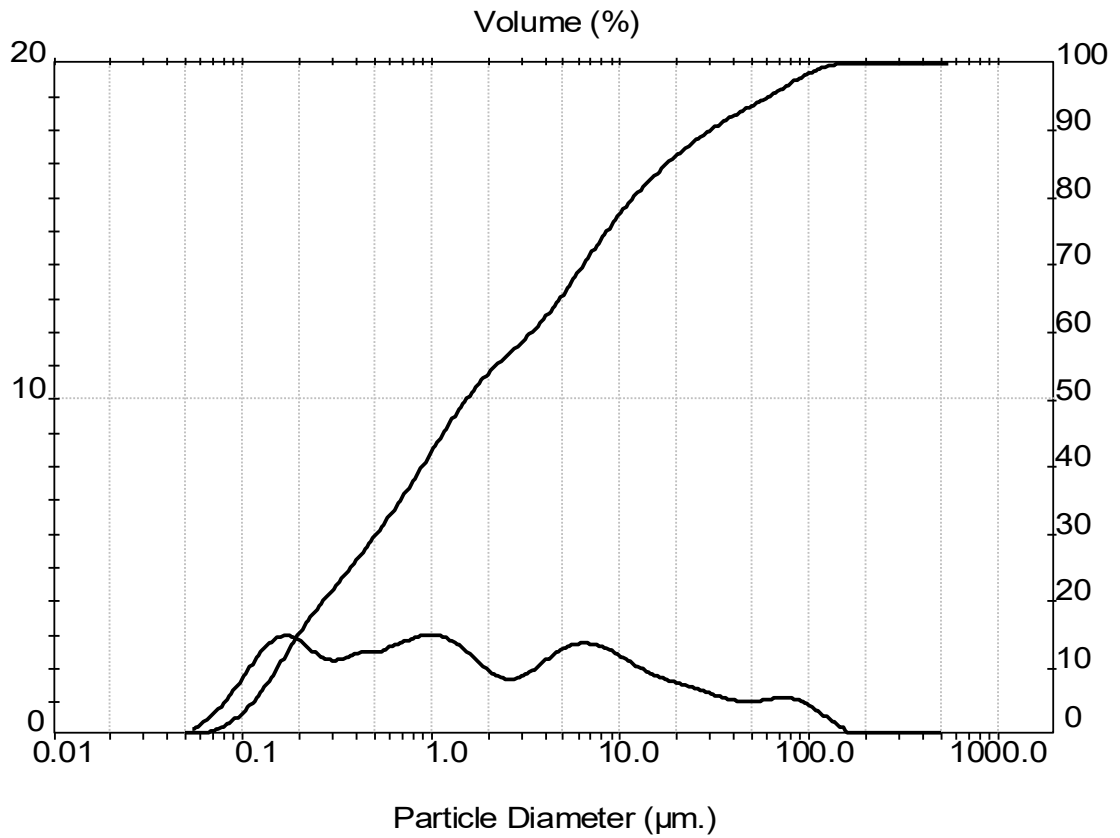
WANG, N.; SI, Y.; WANG, N.; SUN, G.; EL-NEWEHY, M.; AL-DEYAB, S.S.; DING, B. Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration. **Separation and purification technology**. 2014, 126, 44–51.

XUE, Y.; GUO, X.; ZHOU, H.; ZHOU, J. Influence of beads-on-string on na-ion storage behaviors of electrospun carbon nanofibers. **Carbon**, 154, 2019, p.219 – 229.

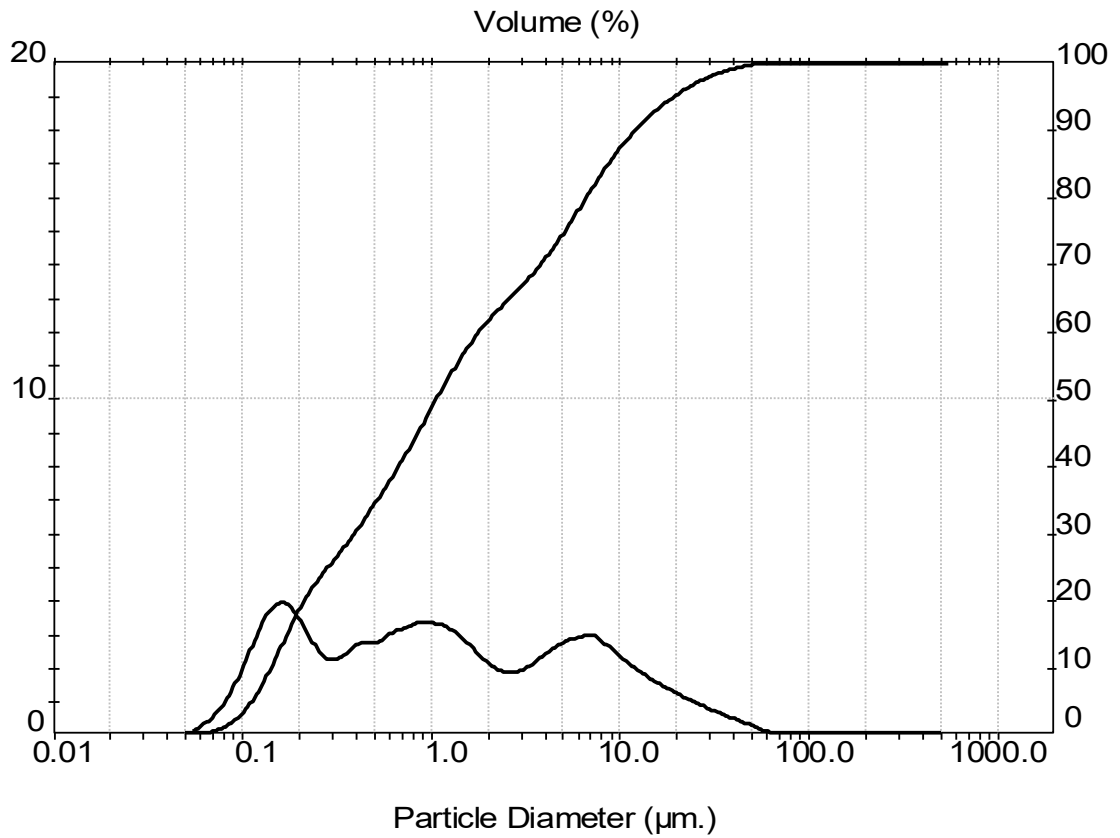
YUN, K. M.; HOGAN, C. J.; MATSUBAYASHI, Y.; KAWABE, M.; ISKANDAR, F.; OKUYAMA, K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. **Chemical engineering science**, v. 62, n. 17, p. 4751-4759, set 2007.

ZHANG, X.; FAN, Y.; WANG, H.; ZHANG, J. Experimental study on the structure and properties of modified nonwoven filter fibers by impregnation with carbon black. **Journal of engineered fibers and fabrics**, v. 15, 2020, p. 1–7.

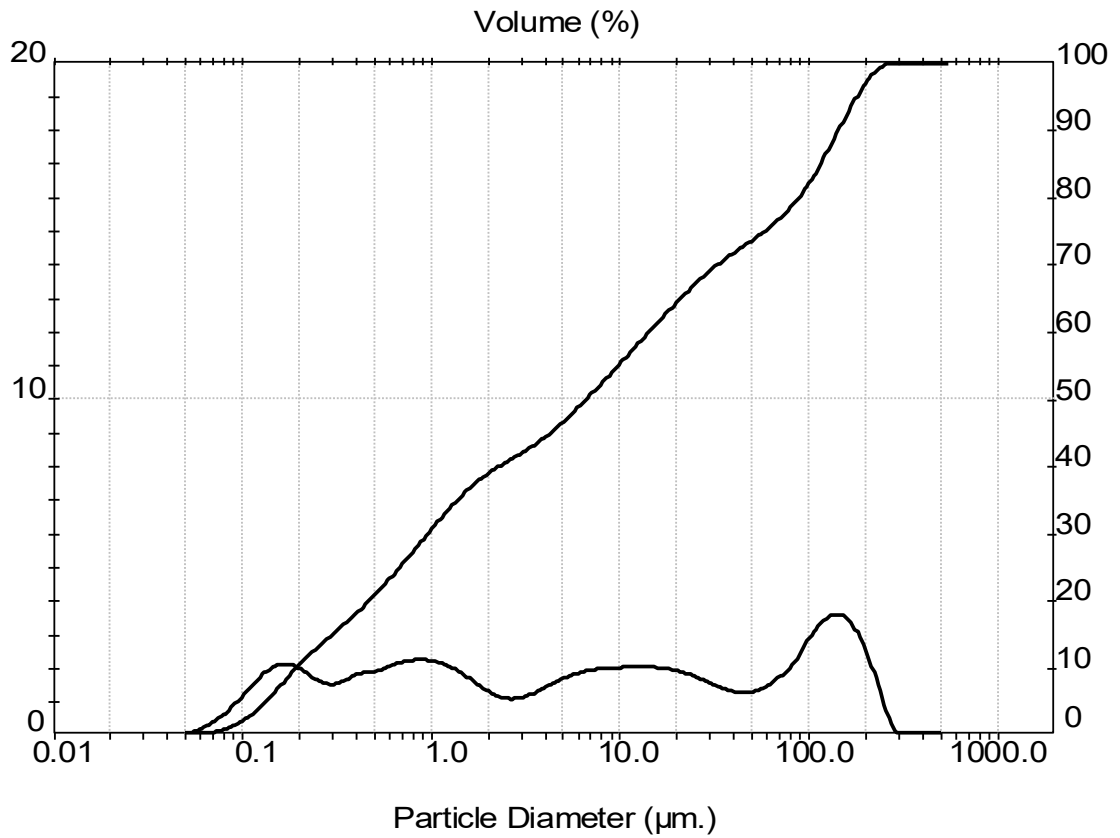
APÊNDICE A – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 2.



APÊNDICE B – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 3.



APÊNDICE C – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 4.



APÊNDICE D – Gráficos de distribuição de diâmetro das partículas de CBCA obtidos na análise Malvern Mastersizer para a amostra 5.

