

# Avaliação da viabilidade de incorporação de cinzas do bagaço da cana-de-açúcar em nanofibras poliméricas para filtração de ar

*Evaluation of the feasibility of incorporating sugarcane bagasse fly ash into polymeric nanofibers for air filtration*

Júlia Aparecida Sanson<sup>1</sup> , Felipe de Aquino Lima<sup>2</sup> , Paulo Augusto Marques Chagas<sup>3</sup> ,  
Vádila Giovana Guerra Béttega<sup>4</sup> 

## 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 tem motivado o reaproveitamento de materiais. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias capazes de tratar o ar poluído torna-se 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 da incorporação de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em nanofibras poliméricas para uso como meios filtrantes para o tratamento de ar. 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 electrospinning. As cinzas foram adicionadas à solução polimérica, variando sua massa de 185 a 1.000 mg. A eficiência na coleta de nanopartículas foi medida com um analisador de partículas por mobilidade elétrica, e a queda de pressão com um manômetro digital. A caracterização das cinzas indicou seu caráter adsorvente, dadas a alta área superficial e a presença de dióxido de silício. Com relação à filtração, a adição de cinzas alterou as características das nanofibras e provocou queda na eficiência e queda de pressão. Os resultados indicam que a incorporação das cinzas se mostra promissora, porém os parâmetros de produção dos meios filtrantes devem ser otimizados a fim de aumentar sua eficiência e possível efeito adsorvente.

**Palavras-chave:** cinzas do bagaço de cana-de-açúcar; nanofibras; electrospinning; meios filtrantes.

## ABSTRACT

With the intensification of industrialization, the disposal of contaminants in the atmosphere has grown, causing impacts on the ecosystem. In addition, 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 becomes increasingly necessary, as well as the discovery of nobler applications for waste. Thus, the objective of this work was to evaluate the feasibility of incorporating fly ash from sugarcane bagasse into polymeric nanofibers for use as filter media for air treatment. For this, the ashes were ground, sieved and the material was characterized in order to obtain the particle size distribution, density, surface area, and chemical composition. Cellulose acetate nanofibers were produced using the electrospinning technique. The ashes were added to the polymeric solution, varying its mass from 185 to 1,000 mg. The efficiency of the filter media in collecting nanoparticles was measured with an electrical mobility particle analyzer and the pressure drop with a digital manometer. Ash characterization indicated its adsorbent character, given the high surface area and the presence of silica oxides. Regarding filtration, the addition of ash altered the characteristics of the nanofibers and caused a drop in collection efficiency and pressure drop. The results indicate that the incorporation of ashes is promising, however the production parameters of the filter media must be optimized to increase their efficiency and possible adsorbent effect.

**Keywords:** sugarcane bagasse fly ash; nanofibers; electrospinning; filtration.

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos - São Carlos (SP), Brasil.

<sup>2</sup>Engenheiro Químico pela Universidade Federal de São João del-Rei. Mestre e Doutorando em Engenharia Química pela Universidade Federal de São Carlos - São Carlos (SP), Brasil.

<sup>3</sup>Engenheiro de Biotecnologia pela Universidade Estadual de São Paulo. Doutor em Biotecnologia pela Universidade Federal de São Carlos - São Carlos (SP), Brasil.

<sup>4</sup>Engenheira Química e Doutora pela Universidade Federal de São Carlos. Professora Associada do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos - São Carlos (SP), Brasil.

\*Endereço para correspondência: Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Química - Rodovia Washington Luis, KM 235. São Carlos, SP. CEP: 13565-905. E-mail: vadila@ufscar.br

## 1. INTRODUÇÃO

A busca por tecnologias de tratamento e remoção de poluentes do meio ambiente tem se tornado cada vez mais frequente no mundo, visto que o impacto ambiental e de saúde pública causado pelo descarte de contaminantes é crescente 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.

Nesse contexto, a utilização de adsorventes eficientes e baratos, obtidos a partir de resíduos industriais e agrícolas, ganha a atenção de pesquisadores e do setor industrial por permitir 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, 2023).

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 e 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 *et al.*, 2019a; DE OLIVEIRA, AGUIAR

e GUERRA, 2021; 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 podem ser realizadas por meio da incorporação de aditivos às nanofibras. Estudos da literatura já investigaram a adição de ativos, como nanopartículas de ZnO, TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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.*, 2019b; WANG *et al.*, 2014; VANANGAMUDI, HAMZAH e SINGH, 2015; SHALABY *et al.*, 2018).

Em relação a cinzas, a maioria dos estudos encontrados na literatura avalia a capacidade de adsorção das cinzas puras ou em formato de zeólitas (GE, YOON e CHOI, 2018), sendo que a maior parte dos trabalhos com cinzas de bagaço de cana-de-açúcar estuda a remoção de poluentes da água (OLIVEIRA, CUNHA e RUOTOLO, 2019; ALVARENGA e CORREA, 2021; PRAIPIPAT *et al.*, 2023; PRAIPIPAT, NGAMSURACH e ROOPKAM, 2023) e não do ar. Aliar as características favoráveis das nanofibras à filtração e o 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. 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. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar a viabilidade da incorporação das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar em meios filtrantes para aplicação na filtração de ar. 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 e viabilidade para filtração de ar.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

As 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 horas em uma estufa da marca Quimis a uma temperatura de 100°C para promover a sua secagem; posteriormente, as cinzas foram submetidas a tratamentos físicos.

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 de cada tamanho, que operou a uma rotação de, aproximadamente, 73 rpm durante 40 horas. As condições de operação do moinho foram ajustadas de modo a 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 por meio 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.

### 2.2. Caracterização

As CBCA e as nanofibras foram caracterizadas por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para a caracterização das cinzas, 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 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 foram submetidas aos testes de fluorescência de raio x (FRX) e espectrometria por energia dispersiva (EDS), 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.

### 2.3. 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, Modelo 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 – 25 kV e 10 mA), 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%, (CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>SO, Sigma Aldrich) como solventes. Foi utilizado um substrato (Disfoil, Tecido Mosquiteiro em Fibras de Vidro revestido de PVC Antichamas, Malha 18 × 16 Fio 30) que era disposto sobre o coletor metálico e atuava como um suporte para adesão das nanofibras. A distância entre agulha e coletor era de 10 cm, o diâmetro da agulha de 0,7 mm, a tensão elétrica de 14 kV, tempo de coleta das fibras de 1 hora, vazão de solução de 0,4 mL/h e a rotação do coletor de 350 rpm. Esses parâmetros foram determinados e ajustados experimentalmente para a produção de nanofibras resistentes, com fibras dispostas de forma aleatória e sem a formação de *beads*, de modo a obter uma filtração eficiente.

#### 2.4. Incorporação das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

A incorporação das CBCA nas nanofibras se deu pela adição das partículas na solução polimérica antes do electrospinning. Para avaliar a eficiência da incorporação e aderência das partículas nas fibras, foram produzidos diferentes meios filtrantes: sem a adição de CBCA, e outros três em que as massas de CBCA adicionadas foram variadas, sendo 185, 500 e 1.000 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 – 10 mL Kasvi). A solução ficou em um agitador magnético com aquecimento (Kasvi, K40-1820H) por 8 horas, na velocidade de agitação de 1.000 rpm e sem aquecimento. Para as amostras com cinzas, foi incluída uma etapa de banho ultrassônico (Thornton, Model T14) de 2,5 horas, a fim de dispersar as partículas uniformemente nos solventes antes da adição do polímero; posteriormente, a mistura seguiu-se normalmente para a agitação.

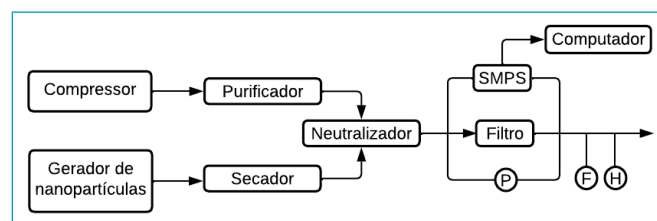
A metodologia de incorporação e os valores adotados para cada um dos parâmetros foram determinados com base em artigos científicos que estudaram a incorporação de cinzas e outros materiais particulados em nanofibras (AHN, CHI e KANG, 2008; KIM *et al.*, 2014; SAUD *et al.*, 2015; PANT *et al.*, 2019),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

#### 2.5. 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 e 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 rotâmetro (TSI, Model 4100) e um higrômetro (Hygropalm, Rotronic) para medição de vazão e umidade. A **Figura 1** apresenta um esquema representativo da unidade experimental da linha de filtração utilizada nos testes.

Todos os testes de eficiência foram conduzidos a 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 cm<sup>2</sup>. 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



**Figura 1** - Esquema da unidade experimental de filtração.

medida, utilizando um manômetro digital (TSI, VelociCalc, Model 3A-181WP09) acoplado à linha de filtração.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. 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 1**.

Como pode ser observado na **Tabela 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, à picnometria com gás Hélio e ao teste BET com adsorção de nitrogênio. Os resultados são apresentados na **Tabela 2**.

Como pode ser visto na **Tabela 2**, as amostras apresentam diferentes valores para os diâmetros. Com relação ao diâmetro mediano  $D(v0,5)$ , 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 e CHOI, 2018; RODRÍGUEZ-DÍAZ *et al.*, 2015).

Nota-se que as densidades obtidas apresentam valores próximos. Já em 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, conclui-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/cm<sup>3</sup> (RODRÍGUEZ-DÍAZ *et al.*, 2015, ZHANG *et al.*, 2020; MINNU, BAHURUDEEN e ATHIRA, 2021). Já para área superficial, os resultados obtidos são inferiores aos reportados, os quais são de 100,68 m<sup>2</sup>/g (RODRÍGUEZ-DÍAZ *et al.*, 2015) e 249,66 m<sup>2</sup>/g (ALVARENGA e CORREA, 2021). É importante destacar que tratamentos químicos podem aumentar a área superficial das cinzas e aumentar a eficiência de adsorção (ALVARENGA e 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.

Em relação à morfologia das partículas, as imagens geradas pela MEV são mostradas na **Figura 2** com diferentes escalas de ampliação.

É possível observar na **Figura 2** que as partículas que constituem as cinzas apresentam forma irregular, diferentes dimensões e diversos poros. Os resultados dos testes de composição da fuligem são apresentados na **Tabela 3**, que contém os resultados das análises de FRX e espectrometria de energia dispersiva (EDS).

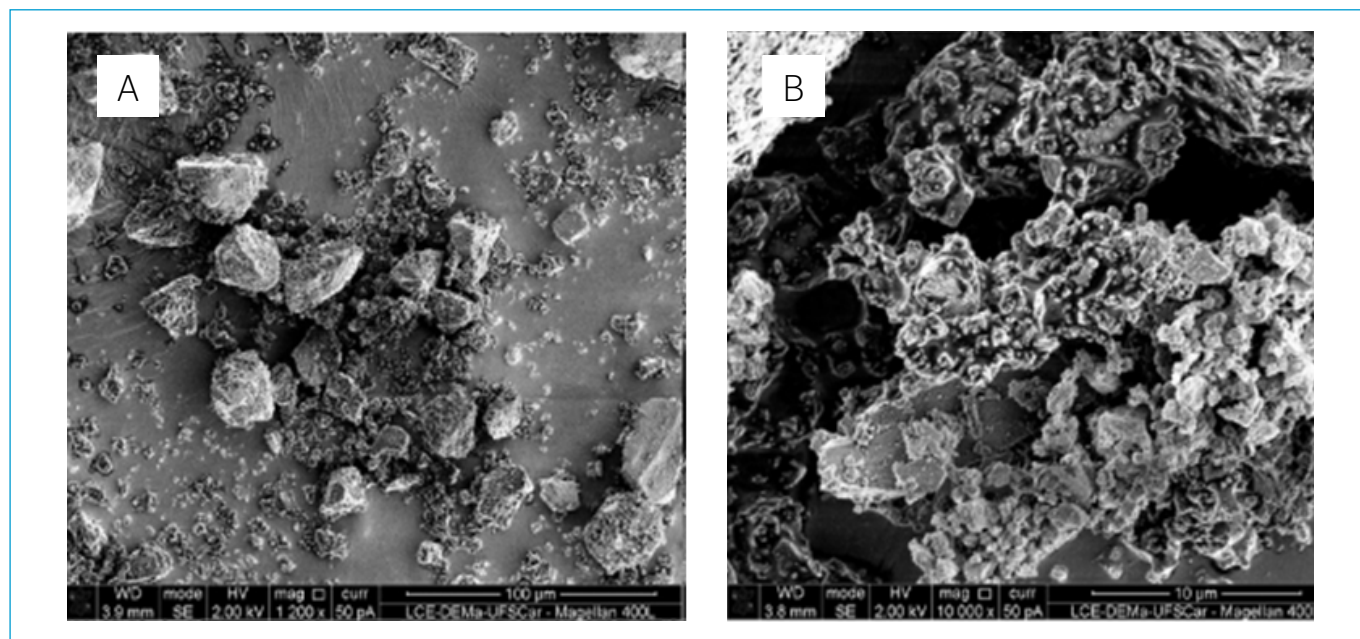
Como visto na **Tabela 3**, os valores das porcentagens dos elementos são diferentes dependendo do método analítico. As cinzas apresentam cerca de 30% de carbono, o que sugere a presença de matéria orgânica remanescente da queima do bagaço, que se manteve, já que a fuligem utilizada não sofreu tratamento 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

**Tabela 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

**Tabela 2** - Diâmetros característicos da fuligem por análise no Malvern Mastersizer.

Amostra	$D(v0,5)$ (µm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Área superficial (m <sup>2</sup> /g)
2	1,51	2,34	95,40
3	1,12	2,38	88,40
4	6,89	2,43	63,20
5	2,16	2,48	51,40



**Figura 2** - Imagens das cinzas obtidas por microscopia eletrônica de varredura: (a) ampliação de 1200 x e (b) ampliação de 1.0000 x.

**Tabela 3** - Resultados da fluorescência de raio X e da espectrometria de energia dispersiva.

FRX	Elemento	Si	Fe	K	Ca	Al	Ti	P
	%	80,77	4,75	4,26	3,63	2,95	1,12	1,01
EDS	Elemento	O	Si	C	Ni	Al	Ca	Mg
	%	33,18	32,87	31,55	1,60	0,38	0,34	0,09

et al., 2015; ZHANG et al., 2020; ALVARENGA e 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.

### 3.2. Meios filtrantes

Primeiramente, os meios filtrantes produzidos foram submetidos à análise de MEV, juntamente com o teste de EDS. Assim, foi possível observar a morfologia das fibras e avaliar sua composição química para averiguar os efeitos da incorporação das CBCA. Na **Figura 3**, é possível ver as nanofibras dos meios filtrantes, que apresentaram diâmetros médios na faixa de 120 a 430 nm, com a diminuição desse valor 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).

Como pode ser visto na **Figura 4**, que apresenta o EDS do meio filtrante contendo 1.000 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.

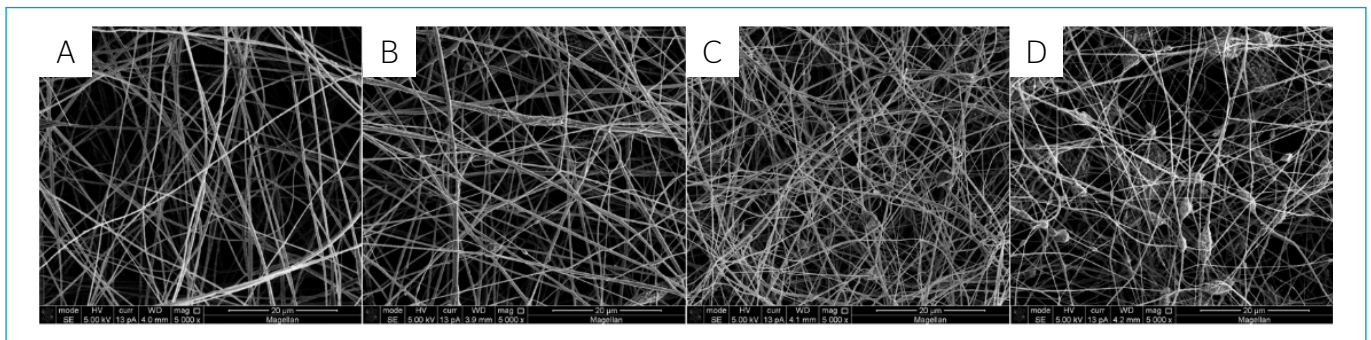
Os meios filtrantes foram avaliados quanto ao seu desempenho na filtração de nanopartículas dispersas em ar. A **Tabela 4** apresenta a média das concentrações em massa e número de nanopartículas, diâmetro mediano, diâmetro médio e desvio padrão geométrico ( $\sigma$ ) da distribuição de tamanho de nanopartículas obtidas na entrada do filtro.

A **Tabela 5** mostra a eficiência global de coleta de nanopartículas e queda de pressão dos meios filtrados produzidos

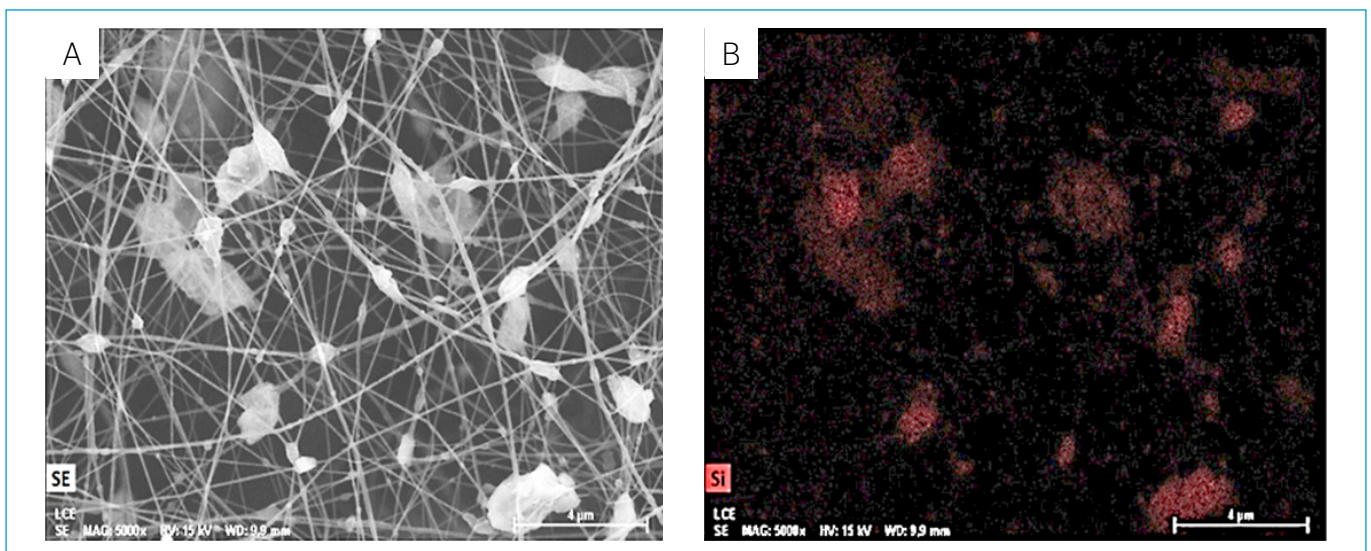
e do suporte utilizado como substrato. As eficiências globais e as quedas de pressão foram medidas a uma vazão de 1,5 L/min de ar contendo nanopartículas de NaCl.

Observando a **Tabela 5**, 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. No entanto, pode-se observar que a adição de CBCA nas nanofibras reduziu a eficiência global de filtração em cerca de 25% para 185 mg e 500 mg, e de 75% para 1.000 mg. Já em 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 1.000 mg. Os resultados podem estar relacionados à diminuição do diâmetro



**Figura 3** - Imagens de microscopia eletrônica de varredura dos meios filtrantes produzidos: a) Sem CBCA, b) 185 mg de CBCA, c) 500 mg de CBCA e d) 1.000 mg de CBCA.



**Figura 4** - Microscopia eletrônica de varredura do meio filtrante com 1.000 mg de CBCA (a) com mapeamento de Silício (b).

**Tabela 4** - 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.

Parâmetro	Massa	Número de partículas
Concentração mássica ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	$34,83 \pm 3,24$	-
Concentração em número de partículas ( $\text{part.}/\text{cm}^3$ )	-	$165878,58 \pm 1448,99$
Diâmetro mediano (nm)	$89,43 \pm 2,02$	$3703 \pm 0,76$
Diâmetro médio (nm)	$99,96 \pm 1,48$	$42,98 \pm 0,90$
Desvio padrão ( $\sigma$ )	$1,69 \pm 0,01$	$1,66 \pm 0,01$

**Tabela 5** - Eficiência global e queda de pressão dos meios filtrantes produzidos.

Meio filtrante	Eficiência global (%)	Queda de pressão (Pa)
Sem CBCA	90,24 ± 6,89	53,50 ± 1,41
185 mg de CBCA	63,67 ± 14,38	17,20 ± 0,00
500 mg de CBCA	63,66 ± 9,77	22,10 ± 0,42
1.000 mg de CBCA	16,16 ± 13,07	11,15 ± 0,07
Suporte	0,12 ± 0,00	0,10 ± 0,00

médio das nanofibras com o aumento da porcentagem de CBCA (RUSSO *et al.*, 2022).

Verifica-se que houve pequena variação na eficiência global de coleta das amostras contendo 185 e 500 mg de CBCA, enquanto para a de 1.000 mg, houve uma queda bastante significativa, o que pode ser explicado pela acentuada aglomeração de cinzas e desordem ocasionada nas fibras (KIM *et al.*, 2013). 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 e GUERRA, 2021; BONFIM *et al.*, 2021). No entanto, os valores de eficiência de coleta para partículas nanométricas ficaram abaixo dos encontrados na literatura (BORTOLASSI *et al.*, 2019b; DE OLIVEIRA, AGUIAR e GUERRA, 2021; BONFIM *et al.*, 2021), principalmente com a incorporação da CBCA.

Esses resultados estão relacionados às modificações nas propriedades físicas das soluções poliméricas com a inclusão de partículas que influenciam a eletrofiliação e ocasionam alterações morfológicas nas fibras, sobretudo quando causam a aglomeração de partículas na superfície das fibras (BORTOLASSI *et al.*, 2019b). Estudos mais aprofundados sobre os efeitos da adição de CBCA à solução polimérica, parâmetros operacionais da eletrofiliação e a influência deles nas características dos meios filtrantes são necessários e estão em andamento para otimização dos meios filtrantes aplicados à filtração de ar.

## 4. 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 acetato de celulose. 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 m<sup>2</sup>/g. Além disso, os testes de composição demonstraram que o material possui alta presença de silício.

Os meios filtrantes foram produzidos, e a incorporação de CBCA foi bem-sucedida, dada a presença de Silício nas nanofibras. De acordo com os resultados, concluiu-se que a adição de CBCA provocou a diminuição da eficiência da filtração e da queda de pressão, na faixa de 25 a 75% para o primeiro e de 31 a 42% para o segundo. Isso pode estar atrelado ao fato de a adição das cinzas à solução polimérica alterar as características da eletrofiliação e das nanofibras geradas, ocasionando a produção de fibras mais finas e meios filtrantes mais porosos. Dessa forma, a otimização do processo de incorporação da CBCA e eletrofiliação mostra-se relevante para a obtenção de meios filtrantes com as características necessárias à filtração de ar.

## AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão ao Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH-ANP), à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro fornecido.

## REFERÊNCIAS

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, p. 4055-63, 2008. <https://doi.org/10.1002/app.28968>

ALVARENGA, A.D.; CORREA, D.S. Composite nanofibers membranes produced by solution blow spinning modified with CO<sub>2</sub>-activated sugarcane bagasse fly ash for eficiente removal of water pollutants. *Journal of Cleaner Production*, v. 285, p. 125376, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125376>



- 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, p. 138697, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.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 (Basel)*, v. 13, p. 1166, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13071166>
- BORTOLASSI, A.C.C. *Desenvolvimento e avaliação de meios filtrantes com nanofibras eletrofiadas e agentes bactericidas aplicados na filtração de ar*. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 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, p. 718-29, 2019a. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.04.094>
- 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 (Basel)*, v. 9, n. 12, p. 1740, 2019b. <https://doi.org/10.3390/nano9121740>
- 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. 6387-408, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03431-w>
- GE, J.G.; YOON, S.K.; CHOI, N.J. Application of fly ash as an adsorbent for removal of air and water pollutants. *Applied Sciences*, v. 8, n. 7, p. 1116, 2018. <https://doi.org/10.3390/app8071116>
- 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, p. 244-50, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.090>
- KIM, H.J.; PANT, H.R.; KIM, J.H.; CHOI, N.J.; KIM, C.S. Fabrication of multifunctional TiO<sub>2</sub>-fly ash/polyurethane nanocomposite membrane via electrospinning. *Ceramics International*, v. 40, n. 2, p. 3023-9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.005>
- 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, p.14-22, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.002>
- 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. 285, p. 124836, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124836>
- NOVACANA. AS USINAS DE AÇÚCAR E ETANOL DO BRASIL. 2023. Disponível em: [https://www.novacana.com/usinas\\_brasil](https://www.novacana.com/usinas_brasil). Acesso em: 28 jun. 2023.
- 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. 956-63, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.069>
- 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, p. 163-72, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.10.122>
- 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 (Basel)*, v. 12, n. 21, p. 3811, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12213811>
- 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*, v. 128, p. 495-514, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.08.015>
- 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, p. 1873, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29055-4>
- 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, p. 1885-95, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9646-6>
- 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, n. 10, p. 108452, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jece.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 TiO<sub>2</sub> nanofibers for effective removal of organic pollutants. *Ceramics International*, v. 41, n. 1, p. 1771-7, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.09.123>

Shalaby, T.; Hamad, H.; Ibrahim, E.; Mahmoud, O.; Al-Oufy, A. Electrospun nanofibers hybrid composites membranes for highly efficient antibacterial activity. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 162, p. 354-64, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.07.016>

Vanangamudi, A.; Hamzah, S.; Singh, G. Synthesis of hybrid hydrophobic composite air filtration membranes for antibacterial activity and chemical detoxification with high particulate filtration efficiency (PFE). *Chemical Engineering Journal*, v. 260, p. 801-8, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.062>

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*, v. 126, p. 44-51, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.017>

XUE, Y.; GUO, X.; ZHOU, H.; ZHOU, J. Influence of beads-on-string on Na-Ion storage behaviors of electrospun carbon nanofibers. *Carbon*, v. 154, p. 219-29, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.08.003>

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, p. 1-7, 2020. <https://doi.org/10.1177/155892502091301>

