



FILTRAÇÃO HÍBRIDA COMO ALTERNATIVA PROMISSORA PARA CONTROLE DE POLUIÇÃO EM PLANTAS DE SINTERIZAÇÃO

BRUNO J. C. DE CASTRO^{1,2}, BÁRBARA K. S. A. ANDRADE¹, CAMILA R. DE LACERDA¹,
RAFAEL SARTIM^{2,3}, MÔNICA L. AGUIAR^{1*}

¹Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

²ArcelorMittal, Global R&D Brazil

³Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Tecnologia Industrial

*e-mail: mlaguiar@ufscar.br

RESUMO – Equipamentos de controle de poluição do ar precisam ser cada vez mais eficientes para atender às regulações de qualidade do ar. Uma das mais promissoras alternativas é a combinação de precipitadores eletrostáticos com filtros de mangas, gerando os filtros híbridos. Entretanto, o desempenho de filtros híbridos para indústrias siderúrgicas ainda não foi estudado. Este trabalho descreve um estudo que avaliou o desempenho de um filtro híbrido em escala de bancada, composto por um precipitador eletrostático e um filtro conectados em série, na coleta de pó de sinterização. Os parâmetros avaliados foram: eficiência de coleta, queda de pressão, distribuição granulométrica das partículas coletadas e porosidade da torta. Com aplicação de campo elétrico, o tempo transcorrido até que a máxima queda de pressão fosse atingida foi consideravelmente maior que o tempo de filtração sem aplicação de tensão, e as eficiências de coleta foram próximas a 100 %. Embora a tensão aplicada tenha promovido a coleta de partículas mais finas no filtro, a porosidade estimada da torta não se alterou significativamente. Se os resultados forem confirmados em estudos futuros para escalas maiores, poderão indicar que a substituição de filtros de mangas convencionais por filtros híbridos em plantas de sinterização é vantajosa.

INTRODUÇÃO

A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que 99 % da população global está exposta a níveis de poluentes do ar que excedem os limites recomendados e que 7 milhões de mortes por ano estão relacionadas aos efeitos combinados da poluição do ar ambiente e doméstico. O problema da poluição do ar também afeta negativamente culturas agrícolas, causa danos a construções e está relacionado às mudanças climáticas e à degradação ambiental. Dentre os poluentes do ar está o material particulado, cujas concentrações máximas recomendadas se tornaram ainda mais restritivas nas diretrizes de qualidade do ar recentemente publicadas pela OMS (WHO, 2021). Filtros eletrostaticamente

assistidos, que intensificam a atração eletrostática do material particulado às fibras, e filtros híbridos, que combinam as operações de precipitação eletrostática e filtração, têm sido desenvolvidos e estudados nas últimas décadas para aplicações em ambientes fechados e para controle de poluição industrial. O objetivo é obter eficiências de coleta superiores às alcançadas por precipitadores eletrostáticos, principalmente para partículas finas, sem aumento ou até mesmo com redução da queda de pressão de filtros de mangas convencionais (DE CASTRO *et al.*, 2020; JAWOREK *et al.*, 2019; JAWOREK *et al.*, 2007).

Com relação ao controle de poluição industrial, a maioria dos estudos sobre filtros híbridos conduzidos até agora abordaram a aplicação para termoelétricas a carvão. A combinação da precipitação eletrostática com a

filtração promoveu aumentos nas eficiências de coleta de cinzas volantes em comparação a precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas operando separadamente (ARAGON *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2016; LONG; YAO, 2012). Aumentos na tensão elétrica aplicada causaram aumentos na eficiência de coleta, não só na zona eletrostática, mas também nos tecidos filtrantes, devido à intensificação do mecanismo de atração eletrostática (FENG *et al.*, 2016). Como o precipitador eletrostático é instalado a montante do filtro, a concentração de material particulado que atinge o tecido é menor que em filtros de mangas convencionais, reduzindo a taxa de aumento da queda de pressão através do filtro. As consequências são ciclos de filtração mais longos, frequências de pulso de limpeza menores, menos desgaste e aumento do tempo de vida útil das mangas, diminuição dos custos com energia e manutenção (GUTIÉRREZ ORTIZ *et al.*, 2007; LONG; YAO, 2012). Em filtros híbridos, a coleta de partículas maiores ocorre de maneira preferencial no precipitador eletrostático, enquanto as partículas mais finas são coletadas pelo filtro (FENG *et al.*, 2016; LONG; YAO, 2013; TU *et al.*, 2018).

Dependendo das características físicas do material particulado, tais como formato e coesividade, a deposição preferencial de partículas finas no tecido pode levar à formação de tortas extremamente compactas, que causariam o aumento da queda de pressão e a redução dos ciclos de filtração, tornando o filtro híbrido desvantajoso em comparação ao filtro de mangas convencional. Portanto, são necessários estudos para avaliar a filtração híbrida para outras aplicações, como em indústrias siderúrgicas. A produção de aço mundial tem crescido consideravelmente desde o início dos anos 2000 (REMUS *et al.*, 2013), ultrapassando $1950 \cdot 10^6$ toneladas em 2021 (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022). As emissões de material particulado de plantas de sinterização correspondem a até 50 % do total de emissões de uma siderúrgica integrada (REMUS *et al.*, 2013). Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de filtração e a evolução da queda de pressão de um filtro híbrido em escala de bancada, utilizando como material particulado pó de sinterização. O filtro híbrido consistiu em um

precipitador eletrostático e um filtro conectados em série, e o meio filtrante utilizado nos testes tinha base de poliéster (PE).

MATERIAL E MÉTODOS

Material particulado

O material particulado utilizado nos experimentos foi o pó de sinterização, representado na fotografia da Figura 1a e na imagem obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da Figura 1b. O pó foi coletado nas tremonhas de um filtro de mangas do sistema de despoeiramento primário da sinterização de uma indústria siderúrgica. O pó coletado nas tremonhas foi a melhor representação possível do material particulado processado pelo filtro de mangas industrial, uma vez que não havia pontos de amostragem nos dutos de entrada de gás do equipamento.

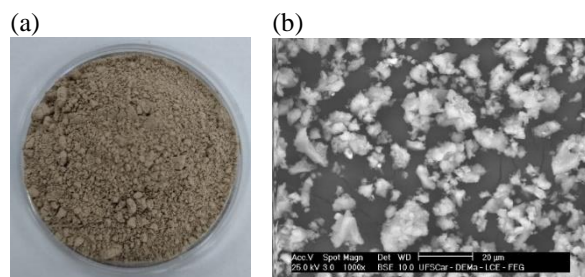


Figura 1: Fotografia (a) e imagem obtida em MEV com magnificação de 1000x (b) do pó de sinterização.

O material foi peneirado em peneira Bertel ASTM 35, Tyler/Mesh 32, com abertura de 0,50 mm, para remoção de partículas grosseiras que poderiam obstruir e até mesmo danificar os equipamentos. O pó foi armazenado em estufa a 60 °C para remoção da umidade por no mínimo 24 horas antes da realização dos ensaios experimentais.

A Figura 2 apresenta a distribuição granulométrica volumétrica do pó de sinterização, determinada por difração a laser, no equipamento Malvern Mastersizer MicroPlus. O pó apresentou característica trimodal, com picos em 0,20, 9,00 e 65,51 µm. O diâmetro volumétrico mediano ($d_{v,0,5}$) e o diâmetro médio ponderado em área, ou diâmetro de Sauter ($d_{3,2}$), foram de $6,48 \pm 0,18$ µm e $0,72 \pm 0,02$ µm, respectivamente. A densidade do material, aferida por picnometria

a hélio no equipamento Micromeritics AccuPyc 1330, foi de $2,3168 \pm 0,0031 \text{ g cm}^{-3}$.

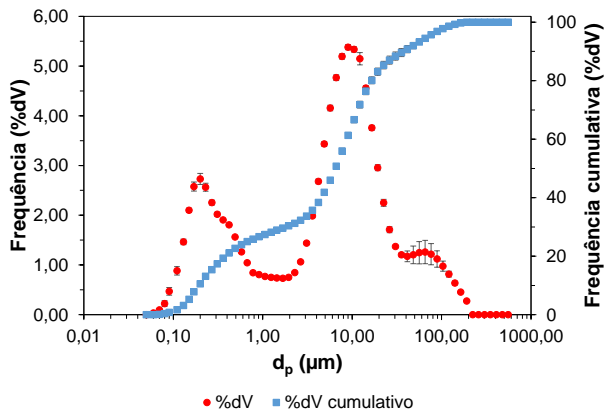


Figura 2: Distribuição granulométrica volumétrica do pó de sinterização.

Material filtrante

O meio filtrante utilizado tinha base de PE. Quatro imagens da lateral do meio filtrante, obtidas em MEV e exemplificadas pela Figura 3a, foram utilizadas para aferição da espessura do material, a partir de análise no *software* Image Pro Plus 7.0. O resultado foi de $2,41 \pm 0,07 \text{ mm}$. Cinco imagens da superfície filtrante do material, também obtidas em MEV, como a representada na Figura 3b, foram analisadas no mesmo *software* para obtenção do diâmetro médio de fibras, de acordo com o procedimento descrito em Bortolassi *et al.* (2017). O diâmetro

médio de fibras resultante foi de $13,78 \pm 2,42 \text{ μm}$.

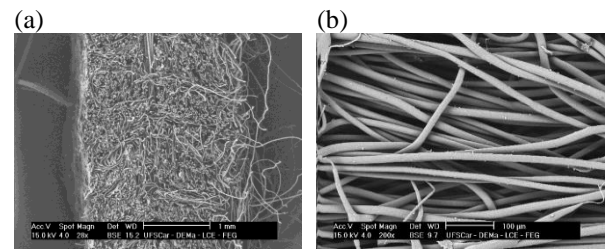


Figura 3: Imagens obtidas em MEV da lateral do meio filtrante de PE, com magnificação de 28x (a) e da superfície filtrante, com magnificação de 200 x (b).

Amostras quadradas, com dimensões de, aproximadamente, $5 \times 5 \text{ cm}$, foram retiradas do meio filtrante, distantes das bordas do tecido, e tiveram suas massas aferidas em balança analítica Shimadzu AY220, com resolução de $0,1 \text{ mg}$. As gramaturas dos materiais foram, então, calculadas por meio da divisão da massa pela área superficial da amostra. O resultado foi de $558,7 \pm 11,0 \text{ g m}^{-2}$.

Equipamento de filtração e metodologia

Os ensaios foram realizados no aparato experimental apresentado esquematicamente pela Figura 4, composto por um sistema alimentador de pó, um precipitador eletrostático (ESP) (1), uma caixa de filtração (2), um sistema exaustor e um rotâmetro (5).

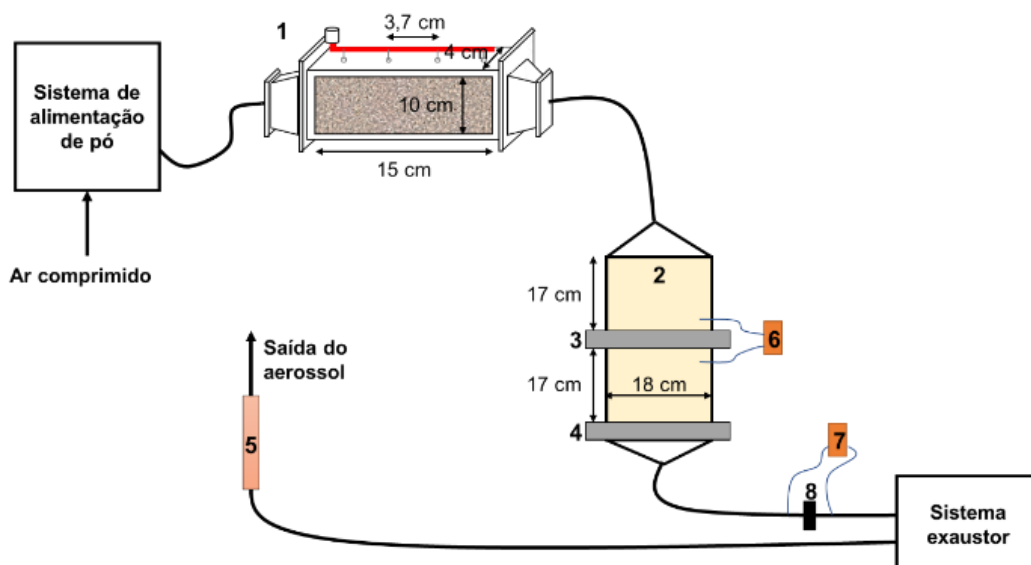


Figura 4: Filtro híbrido de bancada. 1- ESP; 2- Caixa de filtração; 3- Suporte para filtro; 4- Suporte para filtro absoluto; 5- Rotâmetro; 6- Sensor de pressão diferencial para medição da queda de pressão no filtro; 7- Sensor de pressão diferencial para medição da queda de pressão na placa de orifício; 8- Placa de orifício.

O sistema alimentador de pó consistia de um prato giratório de aço inoxidável com um sulco para deposição do material particulado, conforme mostra a Figura 5. O pó foi continuamente alimentado ao sulco por um reservatório de alumínio em formato de cone, conectado a um sistema vibratório, e um nivelador fazia a acomodação do pó no sulco. Uma trompa de vácuo alimentada com ar comprimido foi utilizada para realizar a sucção do pó presente no sulco e fornecer aerossol para a linha, a partir da formação de vácuo pelo efeito Venturi. A velocidade de rotação do prato foi ajustada de acordo com a concentração de material particulado desejada no aerossol, de $15,0 \text{ g m}^{-3}$. O sistema alimentador de pó foi isolado em uma caixa de acrílico com boa vedação, à qual foi fornecido ar comprimido seco continuamente durante os experimentos, de forma que a umidade da caixa fosse mantida em torno de 20 %.

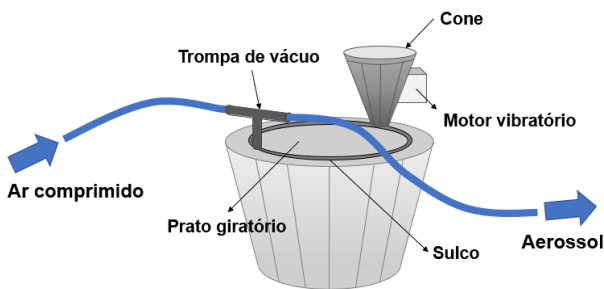


Figura 5: Sistema de alimentação de pó.

O aerossol seguia então, para o ESP (1), do tipo placa-fio de simples estágio, construído em acrílico. Na entrada do equipamento, havia um difusor para promover a homogeneização do escoamento do aerossol. Nas paredes laterais, duas placas de cobre aterradas com altura de 10,0 cm e comprimento de 15,0 cm faziam o papel de eletrodos de coleta. A distância entre as placas coletoras era de 4,0 cm.

Foram utilizados como eletrodos de descarga quatro fios de aço inoxidável com diâmetros de 0,30 mm, espaçados de 3,7 cm uns dos outros, dispostos na região central entre as placas coletoras e fixados por meio de um suporte de cobre localizado na parte superior do equipamento. Os eletrodos de descarga foram energizados por fonte de alta tensão HIPOT DC HP5432, com resolução de 0,1 kV. Os campos elétricos (tensão elétrica aplicada ao ESP dividida pela distância entre os eletrodos de

descarga e as placas coletoras) foram de 0,0, 4,0 e $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$. Valores entre 0,0 e $4,0 \text{ kV cm}^{-1}$ foram descartados por não promoverem deposições homogêneas de pó sobre as placas coletoras, indicando campos elétricos incipientes. Com valores acima de $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$, o rompimento dielétrico ocorria antes do fim dos experimentos.

Após passar pelo ESP, o ar e as partículas que não eram coletadas passavam pela caixa de filtração (2), que continha duas gavetas de aço inoxidável: a primeira (3) para alocação da amostra de material filtrante a ser analisada, e a segunda (4) para alocação de filtro absoluto para retenção das partículas que passavam pelo primeiro material filtrante. Ambas as gavetas apresentavam área circular com diâmetro de 18,0 cm para alocação dos filtros.

Um sensor de pressão diferencial NXP MPXV7002DP (6) foi instalado para medição da queda de pressão através do filtro. O sensor foi conectado a uma placa Arduino, que, por sua vez, foi conectada a um computador por meio de um cabo USB para aquisição dos dados. A aquisição dos dados durante os ensaios foi realizada por meio do *software* CoolTerm 1.4.4.

A vazão do sistema foi mantida constante, em valor previamente estipulado, por meio da atuação de um inversor de frequência Schneider Altivar 18 conectado a um motor WEG 0398 A037373, de 60 Hz, que acionava o exaustor Ibram CP0850. A atuação do inversor foi controlada por meio de outro sensor diferencial de pressão (7), que fazia a medição da queda de pressão através de uma placa de orifício (8). Um rotâmetro Gilmont GF2500 (5) instalado no final da linha foi utilizado para conferir as vazões. As vazões a serem estabelecidas no rotâmetro, em NL min^{-1} , foram corrigidas a partir das vazões reais, levando em conta a pressão e temperatura ambientes.

A velocidade superficial de filtração, V_f , para todos os ensaios experimentais foi definida em $2,0 \text{ m min}^{-1}$, pois este valor está contido na faixa comumente utilizada em filtros de mangas industriais, de $0,3\text{-}3,7 \text{ m min}^{-1}$ (Morris; Allen, 1997), e é a velocidade recomendada pela norma VDI 3926 (2004) para a simulação da operação de filtros de mangas. Como a área superficial de filtração era circular com diâmetro de 18,0 cm, a vazão volumétrica do aerossol em todos os ensaios foi mantida em

0,051 m³ min⁻¹, ou 51 L min⁻¹. A velocidade de escoamento no ESP foi, portanto, igual a 12,7 m min⁻¹, ou 0,2 m s⁻¹. Os ensaios foram realizados à temperatura na faixa de 26–31 °C, pressão ambiente de 91,9–92,3 kPa, umidade relativa do ar na cabine de alimentação do pó em 18–24 %.

Eficiência de filtração: Antes de cada ensaio, foram aferidas as massas da parte central do ESP, $m_{i,ESP}$, do filtro de PE, $m_{i,F}$, e do filtro absoluto, $m_{i,A}$, em balança Marte AD5002, com resolução de 0,01 g, e a queda de pressão inicial através do filtro de PE foi anotada. Quando a queda de pressão através do filtro e da torta atingiu 1000 Pa acima da queda de pressão inicial do filtro, a alimentação de ar comprimido foi interrompida e o prato giratório do sistema de alimentação de pó foi desligado. A queda de pressão máxima de 1000 Pa foi definida também com base na norma VDI 3926 (2004). O tempo total do ensaio foi registrado. Aferiram-se, então, as massas finais da parte central do ESP, $m_{f,ESP}$, do filtro com torta, $m_{f,F}$, e do filtro absoluto, $m_{f,A}$. As Equações 1–3 foram utilizadas para calcular as eficiências de coleta do ESP, η_{ESP} , do filtro, η_F , e a eficiência global do filtro híbrido, η_{HF} , respectivamente. As eficiências calculadas dessa forma desconsideram a massa de material particulado que se depositava por ação da gravidade nas tubulações.

$$\eta_{ESP} = \frac{(m_{f,ESP} - m_{i,ESP})}{(m_{f,ESP} - m_{i,ESP}) + (m_{f,F} - m_{i,F}) + (m_{f,A} - m_{i,A})} \quad (1)$$

$$\eta_F = \frac{(m_{f,F} - m_{i,F})}{(m_{f,F} - m_{i,F}) + (m_{f,A} - m_{i,A})} \quad (2)$$

$$\eta_{HF} = 1 - (1 - \eta_{ESP})(1 - \eta_F) \quad (3)$$

Queda de pressão: Durante os ensaios, a queda de pressão através do filtro, que aumentava em decorrência da formação da torta de material particulado, foi acompanhada e registrada a cada segundo pelo *software* CoolTerm 1.4.4. A partir dos registros, foram construídos gráficos de queda de pressão em decorrência da torta de filtração, ΔP_c , em função do tempo de filtração, t_f . Ou seja, o valor de queda de pressão inicial, referente à queda de pressão através do meio filtrante

virgem, foi descontado dos registros para a construção dos gráficos.

Distribuição granulométrica volumétrica:

Amostras do material particulado retido nas placas do ESP e no filtro de PE foram coletadas ao final dos ensaios e tiveram suas distribuições granulométricas volumétricas determinadas pelo método de difração a *laser*, no equipamento Malvern Mastersizer MicroPlus.

Porosidade da torta: As porosidades das tortas formadas, ε_c , foram estimadas a partir das correlações de Ergun (Equação 4), MacDonald (Equação 5) e Kozeny-Carman (Equação 6), nas quais L_c é a espessura da torta, μ a viscosidade dinâmica do ar, ρ_g a densidade do ar, B um parâmetro igual a 4,0 para partículas rugosas, k um parâmetro igual a 5,0 para partículas irregulares, e C o fator de correção de escorregamento de Cunningham. A equação de Ergun foi desenvolvida para descrever a queda de pressão gerada ao escoamento através de um leito fixo de partículas. MacDonald *et al.* (1979) revisaram a equação de Ergun, de modo a considerar os desvios provocados por partículas não esféricas. Já a equação de Kozeny-Carman representa a torta como uma série de canais paralelos, cujo volume total é igual ao volume de vazios da torta e cuja área superficial é igual à área superficial das partículas que a constituem (Cheng; Tsai, 1998; Endo *et al.*, 1998; Ergun, 1952; MacDonald *et al.*, 1979).

$$\frac{\Delta P_c}{L_c} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_c)^2 \mu V_f}{\varepsilon_c^3 d_{3,2}^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_c) \rho_g V_f^2}{\varepsilon_c^3 d_{3,2}} \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P_c}{L_c} = 180 \frac{(1 - \varepsilon_c)^2 \mu V_f}{\varepsilon_c^3 d_{3,2}^2} + B \frac{(1 - \varepsilon_c) \rho_g V_f^2}{\varepsilon_c^3 d_{3,2}} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta P_c}{L_c} = 18 \frac{2k(1 - \varepsilon_c)^2 \mu V_f}{\varepsilon_c^3 d_{3,2}^2 C} \quad (6)$$

A viscosidade dinâmica do ar, μ , presente nas Equações 4–6, foi estimada a partir da Lei de Sutherland com três coeficientes (Equação 7). Nesta equação, μ_0 é a viscosidade de referência à temperatura T_0 , igual a $1,716 \cdot 10^{-5}$ Pa s, T_0 a temperatura de referência, igual a 273,11 K, S a constante de Sutherland, igual a 110,56 K e T a temperatura do ar. Já a densidade do ar, ρ_g , foi calculada por meio da Equação 8, proveniente da lei dos gases ideais,

na qual P é a pressão do ar, M a massa molar do ar, igual a $0,029 \text{ kg mol}^{-1}$, e R a constante dos gases ideais, igual a $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Em todos os experimentos, μ se manteve na faixa de $(1,84\text{--}1,86)\cdot 10^{-5} \text{ Pa s}$, enquanto ρ_g ficou na faixa de $1,054\text{--}1,069 \text{ kg m}^{-3}$.

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (7)$$

$$\rho_g = \frac{PM}{RT} \quad (8)$$

A espessura das tortas foi estimada a partir da Equação 9, na qual A_f é a área superficial de filtração e ρ_p a densidade do material particulado. Tal estimativa é plausível para filtros com altas eficiências de coleta, próximas a 100 %, como é o caso do meio filtrante de PE utilizado neste trabalho (Aguiar; Coury, 1996).

$$L_c = \frac{m_{f,F} - m_{i,F}}{A_f \rho_p (1 - \varepsilon_c)} \quad (9)$$

Teste estatístico

Para comparar os resultados e verificar a influência dos fatores nas variáveis dependentes, análises de variância (ANOVA) foram realizadas juntamente com o teste Tukey, com nível de significância de 0,05, ou seja, com intervalo de confiança de 95 %, por meio do software Statistica 7.0. Portanto, para P-valores menores que 0,05, a hipótese nula foi rejeitada, o que significa que as médias sob comparação foram diferentes e que o fator teve influência significativa sobre a variável dependente. Quanto menor o P-valor, menor o risco de a hipótese nula ter sido rejeitada erroneamente.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Eficiência de filtração

As porcentagens de massa de pó retida pelo ESP, pelo filtro de PE e pelo filtro absoluto em relação à massa total alimentada ao sistema estão na Figura 6. Com campo elétrico em $0,0 \text{ kV cm}^{-1}$, ou seja, sem aplicação de tensão, não houve coleta de pó pelas placas do ESP. Com campo elétrico em $4,0 \text{ kV cm}^{-1}$, aproximadamente metade da massa de pó alimentada ficou retida nas placas do ESP. O aumento da intensidade do campo elétrico para

$5,0 \text{ kV cm}^{-1}$ fez com que a concentração de íons aumentasse, intensificando o carregamento elétrico das partículas. Dessa forma, mais partículas foram desviadas das linhas de fluxo do escoamento em direção às placas do ESP, onde foram coletadas. A intensidade de campo elétrico influenciou de maneira significativa a eficiência de coleta do ESP. As três eficiências foram diferentes entre si, com P-valor de $4,294 \cdot 10^{-6}$. Resultados semelhantes foram encontrados no trabalho de Long; Yao (2012), em que foi realizada a modelagem e simulação de um filtro híbrido, e nos ensaios experimentais reportados por Feng *et al.* (2016) e De Castro *et al.* (2021).

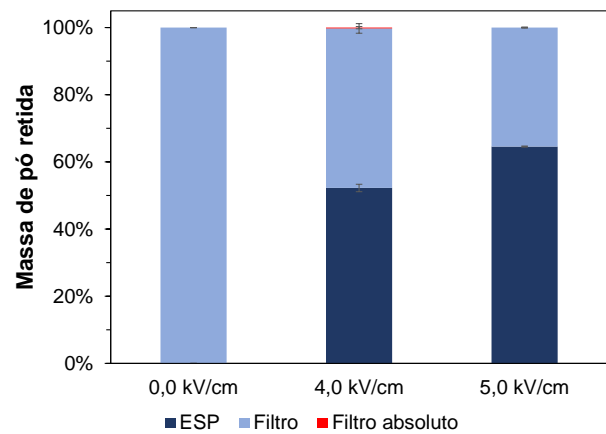


Figura 6: Porcentagem de massa de pó retida pelo ESP, pelo filtro de PE e pelo filtro absoluto, desconsiderando a perda de pó na linha por ação gravitacional.

Com campo elétrico em $0,0 \text{ kV cm}^{-1}$, praticamente toda a massa de pó alimentada ao sistema foi retida pelo filtro. Com aplicação de tensão no ESP, o filtro continuou retendo as partículas com eficiências próximas a 100 %, ou seja, quase toda a parcela de pó que passou pelo ESP sem ser coletada foi retida pelo filtro. Nas três condições de intensidade de campo elétrico, apenas uma porcentagem ínfima de pó passou pelo filtro, sendo retida no filtro absoluto.

O campo elétrico não teve influência significativa sobre as eficiências do filtro, nem nas eficiências globais do filtro híbrido com qualquer um dos pós. Nesses casos, os resultados de P-valor foram maiores que 0,05, e os três valores de eficiências de cada bloco foram estatisticamente iguais entre si. Este resultado difere dos obtidos por Feng *et al.* (2016) e De Castro *et al.* (2021), que mostraram

que o aumento da tensão elétrica aplicada ao ESP intensificou a coleta pelo filtro do sistema híbrido. A aparente divergência é explicada por três motivos.

Primeiramente, mesmo sem tensão elétrica aplicada ao ESP, a eficiência do filtro de PE já foi muito próxima a 100 %, não havendo margem para aumentos. Em segundo lugar, as faixas de diâmetros avaliadas foram muito diferentes. Feng *et al.* (2016) avaliaram a eficiência de coleta de partículas com diâmetros na faixa de 0,5–2,5 μm , e De Castro *et al.* (2021), de partículas na faixa de 0,01–0,3 μm . Nos dois casos, havia uma parcela considerável de partículas com diâmetros na faixa em que os mecanismos de coleta mecânicos – difusão Browniana, interceptação e inercial – são ineficazes. Dessa forma, aumentos na coleta de partículas pelo mecanismo eletrostático foram observados. Por fim, o método usado pelos dois trabalhos citados foi baseado na contagem de partículas por faixa de diâmetro, resultando em eficiências de coleta fracionárias, em que até mesmo partículas muito finas exercem grande influência. Neste trabalho, as eficiências foram medidas pelo método gravimétrico, em que partículas muito finas, com massas desprezíveis, exercem pouca influência.

Queda de pressão

O gráfico de queda de pressão em função do tempo de filtração é apresentado na Figura 7. Os tempos totais de filtração, ou seja, os tempos transcorridos até que a queda de pressão através do filtro e da torta atingisse 1000 Pa acima da queda de pressão inicial do filtro, estão na Tabela 1. Assim como observado nos trabalhos de Gutiérrez Ortiz *et al.* (2007) e Long; Yao (2012), maiores tensões elétricas provocaram menores taxas de aumento da queda de pressão através do filtro. Este resultado está relacionado à influência significativa da tensão elétrica na eficiência de coleta do ESP. Maiores tensões promoveram maiores coletas de material particulado pelas placas do ESP e, conseqüentemente, fizeram com que concentrações menores de partículas chegassem ao filtro. Dessa forma, a queda de pressão aumentou de forma mais lenta.

A ANOVA e o teste Tukey mostraram que o campo elétrico teve influência significativa sobre o tempo total de filtração,

com P-valor igual a $3,477 \cdot 10^{-3}$. O tempo de filtração foi menor quando não havia tensão aplicada ao precipitador eletrostático, ou seja, com campo elétrico em $0,0 \text{ kV cm}^{-1}$. Com intensidade do campo elétrico em $4,0$ e $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$, não houve diferença estatística entre os tempos de filtração, mostrando que o incremento de eficiência de coleta alcançado no ESP com o aumento do campo elétrico de $4,0$ para $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$ não foi suficiente para que houvesse aumento adicional significativo do tempo de filtração.

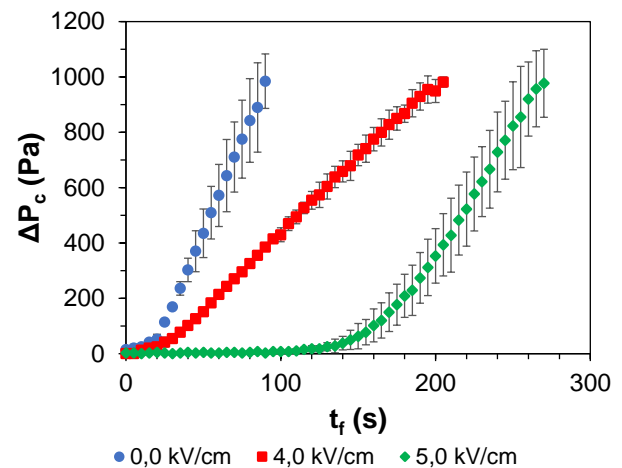


Figura 7: Queda de pressão devido à deposição de partículas no meio filtrante em função do tempo de filtração.

Tabela 1: Tempo total de filtração (letras sobrescritas diferentes indicam valores estatisticamente diferentes).

| $E \text{ (kV cm}^{-1}\text{)}$ | $t_f \text{ (s)}^{(1)}$ |
|---------------------------------|-------------------------|
| 0,0 | 100 ± 16^a |
| 4,0 | 216 ± 10^b |
| 5,0 | 281 ± 21^b |

⁽¹⁾ P-valor = $3,477 \cdot 10^{-3}$.

Distribuição granulométrica volumétrica

Os diâmetros volumétricos medianos, $d_{v,0,5}$, das distribuições granulométricas dos materiais coletados nas placas do ESP e na torta do filtro de PE após os ensaios de filtração estão na Tabela 2. O material coletado por precipitação eletrostática apresentou diâmetros maiores que o coletado pelo filtro. Conforme mostraram os resultados das simulações realizadas por Long; Yao (2013) e Tu *et al.*

(2018) e os resultados experimentais descritos por Liu *et al.* (2016), partículas menores adquirem baixas cargas elétricas, ficando mais suscetíveis à força de arraste. Partículas maiores, por sua vez, têm maiores probabilidades de serem interceptadas pelos íons presentes no campo elétrico e, dessa forma, adquirem cargas elétricas maiores. Assim, a força elétrica passa a ter influência significativa sobre a trajetória delas, desviando-as das linhas de fluxo do gás e fazendo com que sigam em direção aos eletrodos de coleta.

Tabela 2: Diâmetros volumétricos medianos dos materiais amostrados nas placas do ESP e na torta formada sobre o filtro (letras sobrescritas diferentes indicam valores estatisticamente diferentes).

| $d_{v,0.5}$ (μm) | | |
|-------------------------------|--------------------|-----------------------------|
| E (kV cm^{-1}) | ESP ⁽¹⁾ | Filtro de PE ⁽²⁾ |
| 0,0 | -(³) | $5,01 \pm 0,08^a$ |
| 4,0 | $6,65 \pm 0,68^a$ | $3,01 \pm 0,69^b$ |
| 5,0 | $5,03 \pm 0,20^b$ | $2,58 \pm 0,19^b$ |

⁽¹⁾ P-valor = $2,356 \cdot 10^{-4}$.

⁽²⁾ P-valor = $2,753 \cdot 10^{-5}$.

⁽³⁾ Material insuficiente para realizar a análise.

O teste estatístico mostrou que houve influência significativa do campo elétrico sobre a granulometria do pó coletado pelas placas do ESP. O diâmetro volumétrico mediano do pó coletado por precipitação eletrostática foi menor com campo elétrico em $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$ que em $4,0 \text{ kV cm}^{-1}$, com P-valor de $2,356 \cdot 10^{-4}$. O aumento da tensão elétrica aplicada ao ESP aumentou a concentração de íons e possibilitou que partículas menores fossem carregadas, intensificando sua coleta pelas placas do ESP.

A intensidade de campo elétrico também teve influência significativa sobre a granulometria das amostras de torta, com P-valor igual a $2,753 \cdot 10^{-5}$. A torta formada no filtro de PE sem aplicação de tensão no ESP apresentou diâmetro volumétrico mediano maior que as tortas formadas nos ensaios com campos elétricos em $4,0$ e $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$. Com aplicação de tensão, houve a coleta preferencial de partículas maiores pelas placas do ESP, e

apenas as partículas mais finas chegaram ao filtro PE. O diâmetro volumétrico mediano das amostras de torta variou pouco com o aumento do campo elétrico de $4,0$ para $5,0 \text{ kV cm}^{-1}$, não apresentando diferença estatística.

Porosidade da torta

As porosidades das tortas formadas no filtro de PE, estimadas usando as correlações de Ergun, MacDonald e Kozeny-Carman, são apresentadas pela Figura 8. As três equações forneceram valores próximos. O campo elétrico não influenciou a porosidade da torta. Embora a aplicação de tensão tenha feito com que o diâmetro volumétrico mediano das partículas que formaram a torta fosse menor, essa redução não foi suficiente para aumentar a compactação da torta. Uma possível explicação é que as partículas que passaram pelo ESP sem serem coletadas carregavam cargas elétricas residuais, que intensificaram a formação de dendritos no filtro. Os dendritos são eficientes na coleta de partículas subsequentes, já que possuem o mesmo diâmetro delas e se projetam na direção do escoamento. Além disso, dendritos levam à formação de tortas mais porosas, reduzindo a taxa de aumento da queda de pressão durante a filtração (Tu *et al.*, 2016; Wang, 2001).

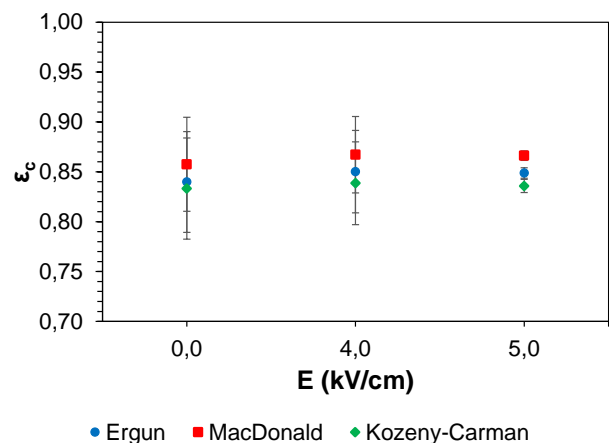


Figura 8: Porosidade da torta estimada.

Aguiar; Coury (1996) realizaram testes de filtração com calcário em quatro diferentes faixas de tamanho e mostraram que as porosidades das tortas estimadas a partir da correlação de Ergun foram muito similares aos valores obtidos por medições diretas para tortas com espessuras maiores que $250 \mu\text{m}$, mas superiores aos valores experimentais para tortas mais finas. As espessuras das tortas de pó de

sinterização do presente trabalho, estimadas a partir da Equação 9, foram em torno de 100 μm para as três condições de campo elétrico. Dessa forma, as porosidades reais das tortas formadas foram, provavelmente, menores que os valores apresentados na Figura 8. De qualquer forma, para o presente trabalho, mais importante que o valor real da porosidade foi o fato de que a aplicação de tensão no ESP, com consequente formação de tortas com granulometria menor, não foi suficiente para reduzir a porosidade da torta de maneira significativa, nem para fazer com que a queda de pressão no filtro aumentasse de forma mais rápida.

CONCLUSÃO

Acréscimos na tensão elétrica aplicada ao filtro híbrido promoveram aumentos na eficiência de coleta no ESP. À medida que mais partículas foram coletadas no ESP, concentrações menores de material particulado chegaram ao filtro de PE, fazendo com que a queda de pressão aumentasse de maneira mais lenta. Em filtros industriais, esse resultado representa uma possível redução na frequência de pulsos para limpeza das mangas, o que reduz o desgaste físico das mangas, aumenta sua vida útil e, conseqüentemente, reduz os custos com energia, manutenção e substituição de mangas.

Em concordância com trabalhos anteriores sobre filtração híbrida, foi observada a coleta preferencial de partículas maiores no ESP e partículas mais finas no filtro, o que poderia levar à formação de tortas extremamente densas e impermeáveis, aumentando a queda de pressão e a energia necessária para limpeza do filtro. Entretanto, esse fenômeno não foi observado no presente trabalho. Até o nível máximo de campo elétrico aplicado ao ESP, não houve redução na porosidade das tortas formadas, provavelmente devido à carga elétrica residual das partículas e a consequente intensificação da formação de dendritos. Portanto, as vantagens de utilização do filtro híbrido, relacionadas ao aumento mais lento da queda de pressão em comparação a filtros de mangas convencionais, foram preservadas. Os resultados foram favoráveis à continuidade dos estudos que têm como objetivo avaliar a viabilidade da substituição de

filtro de mangas convencionais por filtros híbridos em plantas de sinterização.

ABREVIACÕES

| | |
|-------|-------------------------------------|
| ANOVA | Análise de variâncias |
| ESP | Precipitador eletrostático |
| MEV | Microscópio eletrônico de varredura |
| PE | Poliéster |
| OMS | Organização Mundial da Saúde |

NOMENCLATURA, UNIDADE SI

| | |
|-----------------|---|
| A_f | Área superficial de filtração, m^2 |
| B | Parâmetro da equação de MacDonald |
| C | Fator de correção de escorregamento de Cunningham |
| $d_{v,0.5}$ | Diâmetro volumétrico mediano, m |
| $d_{3,2}$ | Diâmetro médio de Sauter, m |
| E | Intensidade de campo elétrico, V m^{-1} |
| k | Parâmetro da equação de Kozeny-Carman |
| L_c | Espessura da torta, m |
| M | Massa molar do ar, kg mol^{-1} |
| $m_{f,A}$ | Massa final do filtro absoluto, kg |
| $m_{f,ESP}$ | Massa final do precipitador eletrostático, kg |
| $m_{f,F}$ | Massa final do filtro de poliéster, kg |
| $m_{i,A}$ | Massa inicial do filtro absoluto, kg |
| $m_{i,ESP}$ | Massa inicial do precipitador eletrostático, kg |
| $m_{i,F}$ | Massa inicial do filtro de poliéster, kg |
| P | Pressão do ar, Pa |
| R | Constante dos gases ideais, $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ |
| S | Constante de Sutherland, K |
| T | Temperatura do ar, K |
| T_0 | Temperatura de referência, K |
| t_f | Tempo de filtração, s |
| V_f | Velocidade superficial de filtração, m s^{-1} |
| ΔP_c | Queda de pressão através da torta de filtração, Pa |
| ε_c | Porosidade da torta |
| η_{ESP} | Eficiência de coleta do precipitador eletrostático |

| | |
|-------------|--|
| η_F | Eficiência de coleta do filtro de poliéster |
| η_{HF} | Eficiência de coleta do filtro híbrido |
| μ | Viscosidade do gás, Pa s |
| μ_0 | Viscosidade de referência à temperatura T_0 , Pa s |
| ρ_g | Densidade do gás, kg m ⁻³ |
| ρ_p | Densidade da partícula, kg m ⁻³ |

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. L.; COURRY, J. R. (1996), Cake Formation in Fabric Filtration of Gases, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol 35, n.10, p.3673–3679.
- ARAGON, G.; SANZ, D.; MUGICA, I.; ROJAS, E.; LARRION, M.; RODRIGUEZ MAROTO, J.; RAMOS, R.; ESCALADA, R.; BORJABAD, E.; GUTIERREZ-CANAS, C. (2015), Enhanced control of fine particle emissions from waste biomass combustion using a hybrid filter, *Energy and Fuels*, Vol 29, n.4, p.2358–2371.
- BORTOLASSI, A. C. C.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. (2017), Characterization and evaluate the efficiency of different filter media in removing nanoparticles, *Separation and Purification Technology*, Vol 175, p.79–86.
- CHENG, Y.-H.; TSAI, C.-J. (1998), Factors Influencing Pressure Drop through a Dust Cake during Filtration, *Aerosol Science and Technology*, Vol 29, n.4, p.315–328.
- DE CASTRO, B. J. C.; DE LACERDA, C. R.; DE MELO, B. R.; SARTIM, R.; AGUIAR, M. L. (2021), Performance assessment of a bench scale hybrid filter in the collection of nanoparticles, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol 154, p.32–42.
- DE CASTRO, B. J. C.; SARTIM, R.; GUERRA, V. G.; AGUIAR, M. L. (2020), Hybrid air filters: A review of the main equipment configurations and results, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol 144, p.193–207.
- ENDO, Y.; CHEN, D.-R.; PUI, D. Y. H. (1998), Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters, *Powder Technology*, Vol 98, n.3, p.241–249.
- ERGUN, S. (1952), Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, n.2, p.89–95.
- FENG, Z.; LONG, Z.; YU, T. (2016), Filtration characteristics of fibrous filter following an electrostatic precipitator, *Journal of Electrostatics*, Vol 83, p.52–62.
- GUTIÉRREZ ORTIZ, F. J.; NAVARRETE, B.; CAÑADAS, L.; SALVADOR, L. (2007), A technical assessment of a particle hybrid collector in a pilot plant, *Chemical Engineering Journal*, Vol 127, n.1–3, p.131–142.
- JAWOREK, A.; KRUPA, A.; CZECH, T. (2007), Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review, *Journal of Electrostatics*, Vol 65, n.3, p.133–155.
- JAWOREK, A.; SOBCZYK, A. T.; KRUPA, A.; MARCHEWICZ, A.; CZECH, T.; ŚLIWIŃSKI, L. (2019), Hybrid electrostatic filtration systems for fly ash particles emission control. A review, *Separation and Purification Technology*, Vol 213, n. August 2018, p.283–302.
- LIU, X.; XU, Y.; FAN, B.; LV, C.; XU, M.; PAN, S.; ZHANG, K.; LI, L.; GAO, X. (2016), Field Measurements on the Emission and Removal of PM 2.5 from Coal-Fired Power Stations: 2. Studies on Two 135 MW Circulating Fluidized Bed Boilers Respectively Equipped with an Electrostatic Precipitator and a Hybrid Electrostatic Filter Precipitator, *Energy & Fuels*, Vol 30, n.7, p.5922–5929.
- LONG, Z.; YAO, Q. (2012), Numerical simulation of the flow and the collection mechanism inside a scale hybrid particulate collector, *Powder Technology*, Vol 215–216, p.26–37.
- LONG, Z.; YAO, Q. (2013), Particle deposition in a full scale hybrid electrostatic-filtration collector, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol 418, n.1, p. 012071.
- MACDONALD, I. F.; EL-SAYED, M. S.; MOW, K.; DULLIEN, F. A. L. (1979), Flow through Porous Media-the Ergun Equation Revisited, *Industrial &*

- Engineering Chemistry Fundamentals, Vol 18, n.3, p.199–208.
- MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. (1997), Gas cleaning in demanding applications, 1st ed, Blackie Academic & Professional, London.
- REMUS, R.; AGUADO MONSONET, M. A.; ROUDIER, S.; DELGADO SANCHO, L. (2013), Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- TU, G.; SONG, Q.; YAO, Q. (2016), Relationship between particle charge and electrostatic enhancement of filter performance, Powder Technology, Vol 301, p.665–673.
- TU, G.; SONG, Q.; YAO, Q. (2018), Mechanism study of electrostatic precipitation in a compact hybrid particulate collector, Powder Technology, Vol 328, p.84–94.
- VDI 3926 Part 1 (2004), Testing of cleanable filter media, Dusseldorf.
- WANG, C.-S (2001), Electrostatic forces in fibrous filters—a review, Powder Technology, Vol 118, n.1–2, p.166–170.
- WHO – World Health Organization (2021), WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, World Health Organization, Geneva.
- WORLD STEEL ASSOCIATION (2022), December 2021 crude steel production and 2021 global crude steel production totals, Brussels, Belgium, Disponível em <https://worldsteel.org/media-centre/press-releases/2022/december-2021-crude-steel-production-and-2021-global-totals/>, Acesso em 11 de maio de 2022.