

Estudo da interação fibra-partícula em processo de separação gás-sólido

Study of fiber-particle interaction in gas-solid separation process

Suellen Cristine Meira¹, Fábio de Oliveira Arouca², João Jorge R. Damasceno³

RESUMO

A crescente preocupação com a poluição atmosférica, agravada pelo avanço industrial, tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à purificação de gases, fundamentais para a sustentabilidade ambiental. Dentre os equipamentos utilizados na separação gás-sólido, destaca-se o filtro do tipo manga, cujo princípio de funcionamento baseia-se na formação de tortas filtrantes que auxiliam na retenção de partículas. Neste estudo, investigou-se a filtração de rocha fosfática e polvilho doce utilizando tecidos de poliácrlato e polipropileno, sob fluxo de ar reverso. As condições operacionais incluíram velocidade superficial de filtração de 10 cm/s, variação de pressão na torta de 20 cmH₂O e velocidades de limpeza de 7, 11 e 15,5 cm/s. A força de adesão foi determinada pelos métodos de Kendall, Rumpf e Seville, sendo este último o que apresentou os maiores valores em todos os ensaios. Os resultados indicaram maior força de adesão nos filtros de polipropileno durante a filtração da rocha fosfática. As distâncias efetivas de separação calculadas pela equação de Rumpf variaram entre 4×10^{-10} e 4×10^{-8} m, intervalo compatível com os dados teóricos propostos por Schubert, validando experimentalmente os resultados obtidos e evidenciando a eficácia do sistema de filtração analisado.

Palavras-chave: força de adesão, filtro de manga, filtração, gás-sólido.

ABSTRACT

The growing concern over air pollution, exacerbated by industrial development, has driven the advancement of technologies aimed at gas purification, which are essential for environmental sustainability. Among the equipment used in gas-solid separation, the bag filter stands out for its efficiency, relying on the formation of filter cakes that aid in particle retention. This study investigated the filtration of phosphate rock and sweet cassava starch using polyacrylate and polypropylene fabrics under reverse airflow conditions. Operational parameters included a superficial filtration velocity of 10 cm/s, a pressure drop across the cake of 20 cmH₂O, and cleaning velocities of 7, 11, and 15.5 cm/s. Adhesion forces were calculated using the models proposed by Kendall, Rumpf, and Seville, with Seville's method yielding the highest adhesion values in all tests. The highest adhesion forces were observed in polypropylene filters used for phosphate rock filtration. Effective separation distances, calculated using Rumpf's equation, ranged from 4×10^{-10} to 4×10^{-8} meters values consistent with the theoretical range proposed by Schubert. These results validate the experimental findings and demonstrate the effectiveness of the filtration system evaluated.

Keywords: adhesion strength, bag filter, filtration, gas-solid.

¹Mestre em Engenharia Química-
Aluna de pós graduação UFU. E-
mail:suellen.meira@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6724-709X>

²Doutor. Professor Faculdade de
Engenharia Química - UFU.
Email:arouca@ufu.edu.br
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-2832-1370>

³Doutor. Professor Faculdade de
Engenharia Química - UFU.
Email: damasceno@ufu.br
ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-8146-2092>

1. INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial proporcionou inúmeros benefícios à sociedade, contudo, também acarretou adversidades, sendo a principal delas a intervenção desenfreada e desmedida no equilíbrio ambiental (BARROS, 2024). O vertiginoso crescimento populacional no mundo acarretou uma intensificação na demanda por bens e serviços. Nota-se, entretanto, uma ínfima preocupação com a preservação dos recursos naturais e industriais, o que tem ocasionado danos irreversíveis tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana. A poluição atmosférica, por exemplo, configura-se como um mal insidioso, profundamente nocivo à saúde, sendo causadora de uma miríade de enfermidades crônicas, alérgicas e respiratórias. Essas emissões poluentes, em grande parte, têm origem nas atividades industriais e na operação de motores à combustão interna.

É imprescindível destacar que, de acordo com dados da Organização Mundial da Saúde (OMS), 91% da população global encontra-se exposta a níveis de poluição atmosférica que excedem os limites recomendados. A poluição do ar em ambientes externos figura como a 13ª principal causa de mortalidade global, sendo responsável por aproximadamente 4,2 milhões de óbitos anuais. A presença de certas substâncias químicas no ar revela-se profundamente nociva, provocando efeitos tóxicos no organismo humano, especialmente em grupos mais vulneráveis, como crianças e idosos, que possuem maior suscetibilidade a complicações respiratórias e outras condições associadas. (OMS, 2021).

Com vistas à mitigação ou até à eliminação das emissões de poluentes no meio ambiente, foram instituídas normas ambientais rigorosas. No Brasil, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regulamentaram padrões nacionais que estabelecem limites máximos para a concentração de poluentes na atmosfera. Para assegurar conformidade com a legislação em vigor, as indústrias devem adotar sistemas de purificação do ar antes de sua liberação na atmosfera, sendo imprescindível a implementação de equipamentos de controle ambiental (SOUZA et al., 2012).

Entre os dispositivos mais empregados destacam-se os filtros de tecido, amplamente reconhecidos por sua alta eficiência na captura de partículas inaláveis, além de apresentarem custos relativamente baixos de operação e manutenção. O princípio de funcionamento desses filtros baseia-se na separação mecânica de partículas, realizada pelo fluxo do gás transportador através do tecido e do leito poroso formado pelas partículas depositadas, conhecido como torta de filtração (AROUCA, 2014).

A interação entre as partículas de poeira transportadas pelo fluxo do fluido e o meio filtrante é determinante para os mecanismos específicos de filtração. Os tecidos utilizados como meios filtrantes frequentemente passam por acabamentos e tratamentos superficiais que visam otimizar sua eficiência e atender a exigências funcionais específicas. Esses tratamentos incluem processos como termomecânica, acabamento especializado, revestimentos químicos de superfície, laminação com membranas porosas e outros aprimoramentos tecnológicos (MAO, 2018).

Os filtros de mangas figuram como dispositivos pioneiros na remoção de partículas provenientes de correntes gasosas, destacando-se por sua simplicidade operacional e elevada eficiência (LIMA, 2019).

Na indústria, esses filtros são amplamente utilizados, atingindo uma eficiência superior a 99% na retenção de partículas inaláveis. Seu princípio de funcionamento baseia-se na impactação direta, em que as partículas se chocam contra a superfície do filtro. Após esse processo, a corrente gasosa é expelida por meio de um sistema de exaustão, que pode ser estrategicamente posicionado antes ou depois do filtro. A maior parte das partículas é retida nos poros do meio filtrante, tornando necessária a realização de limpezas periódicas para evitar a saturação e garantir a eficiência contínua do sistema (MARQUES, 2017).

O crescimento populacional e o aumento contínuo na aquisição de bens de consumo são fatores que contribuem significativamente para a intensificação na geração de resíduos. Nesse contexto, tais materiais representam um risco potencial à saúde humana e ao meio ambiente, em razão de suas propriedades físico-químicas ou infectocontagiosas. Diante disso, torna-se indispensável a implementação de estratégias rigorosas e detalhadas que assegurem o gerenciamento adequado desses resíduos, mitigando seus impactos e promovendo a sustentabilidade (BARBOSA, 2024). Os filtros de manga são amplamente empregados em processos de filtração, sendo fundamental aprofundar o estudo da força de adesão, que se refere à interação entre as fibras do tecido filtrante e as partículas do material pulverulento. Nesse contexto, as partículas são retidas na superfície do tecido filtrante, exigindo remoção periódica para evitar a colmatação, que reduz significativamente a eficiência do sistema de ventilação.

A força de adesão desempenha um papel crucial na análise da remoção da torta de filtração, sendo amplamente utilizada para determinar as condições operacionais ideais que promovam maior eficiência no processo. Essa força é definida como a atração entre dois

corpos sólidos, mediada por forças intermoleculares de curto alcance. A compreensão dessa interação é vital, não apenas por seus benefícios ambientais, mas também pelo impacto positivo que pode gerar na economia industrial.

Portanto o estudo teve como objetivo principal investigar a força de adesão entre partículas e filtros em sistemas de manga por meio de testes de filtração gás-sólido. Para alcançar esse propósito, foram realizadas caracterizações detalhadas dos materiais fibrosos e particulados empregados, além de aprofundar o entendimento das interações partícula-fibra. Esse conhecimento foi obtido por meio da medição da força de adesão em diferentes tipos de materiais pulverulentos e meios filtrantes. Adicionalmente, avaliou-se a correlação com as estimativas teóricas de força de adesão existentes na literatura, buscando refinar a aplicação prática desses conceitos e contribuir para avanços técnicos no campo da filtração industrial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Unidade Experimental

A Figura 1 apresenta o equipamento utilizado para a realização dos processos de filtração e limpeza. Este sistema, pertencente ao Laboratório de Filtração Gás-Sólido da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, possui ampla relevância acadêmica e já foi empregado em diversas pesquisas anteriores na área, atestando sua funcionalidade e adequação aos estudos relacionados.

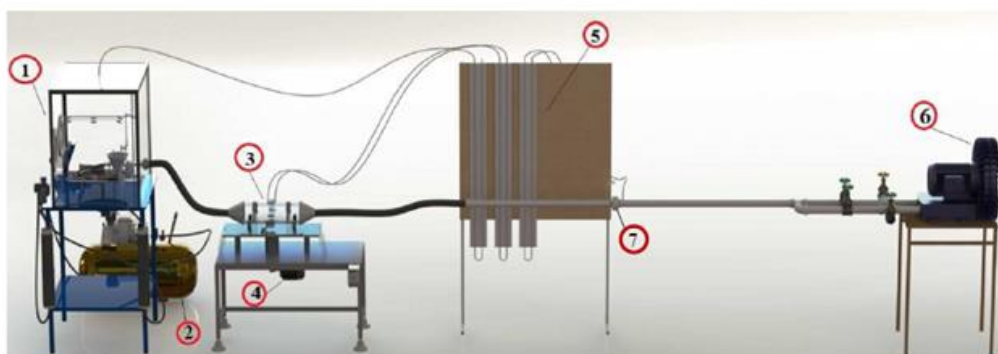


Figura 1. Esquema geral da unidade experimental.

Fonte: Adaptado (AROUCA, 2014).

É importante ressaltar que o motor excêntrico (número 4 da figura 1) neste trabalho não foi utilizado, uma vez que não se empregou vibração mecânica nos testes, já que o intuito do trabalho era calcular a força de adesão às pressões baixas e somente com o efeito da limpeza com velocidades preestabelecidas.

Legenda da figura 1:

- 1 – câmara de alimentação;
- 2 – compressor de ar;
- 3 – câmara de filtração;
- 3– motor excêntrico;
- 4 – monômetros de tubo em U;
- 5 – soprador
- 6 – placa de orifício.

2.2 Meio Filtrante e Materiais Particulados

Os filtros foram recortados em formato circular, adequando-se às dimensões da caixa de filtração. Para minimizar possíveis interferências da umidade durante os ensaios, os pós foram submetidos a um processo de secagem em estufa da marca MedClave, modelo 5, à temperatura constante de 105 °C, por um período de 24 horas.

Procedeu-se o quarteamento das amostras de rocha fosfática moída e polvilho, a fim de garantir representatividade nas análises subsequentes. Utilizando o equipamento *Malvern Mastersizer*, realizou-se análise de difração a laser para determinar a distribuição granulométrica das partículas, assim como os valores de diâmetro médio volumétrico e diâmetro médio de Sauter. Complementarmente, as densidades dos materiais foram medidas por picnometria a hélio, utilizando o equipamento ACCUPYC 1330, da *Micromeritics*. Esses parâmetros são essenciais para o cálculo da porosidade e da força de adesão, conforme os métodos estabelecidos por Kendall et al. e Rumpf.

Além disso, realizaram-se análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para a caracterização detalhada dos tecidos e dos materiais particulados. Os ensaios foram conduzidos em um microscópio eletrônico de varredura da marca Carl Zeiss, modelo EVO MA10, garantindo uma avaliação precisa das características estruturais e morfológicas dos materiais envolvidos no estudo

2.3 Parametros de filtração

Com base em um estudo bibliográfico detalhado, foi estabelecida a velocidade de filtração de 10 cm/s como parâmetro operacional. As velocidades de limpeza selecionadas para este trabalho, de acordo com estudos realizados por Togneti (2007), Tanabe (2009), Fargondi (2010), Nunes (2011), Arouca (2014) e Nunes (2017), serão de 7, 11 e 15,5 cm/s, replicando os valores já consolidados em pesquisas anteriores. Essas velocidades de limpeza foram mantidas constantes por 60 segundos, visto que, conforme constatado por Tieni (2005), após esse intervalo de tempo, não ocorre mais desprendimento significativo da torta de filtração. A queda de pressão durante os testes foi fixada em 20 mmH₂O, garantindo uniformidade e reprodutibilidade nos resultados experimentais.

2.4 Determinação da força de adesão

A adesão é o fenômeno físico pelo qual dois materiais se unem. Existem estudos de partículas - interações de substratos avaliados teoricamente usando modelos analíticos e também experimentalmente utilizando medições de adesão (PETEAN, 2015).

As forças de adesão torta/tecido são um fator determinante para o estabelecimento de um método eficiente de remoção da torta, ou seja, na quantificação da energia necessária para a limpeza de filtros. As interações partícula-partícula também são muito importantes, pois, dependendo de sua intensidade, a porosidade da torta pode ser afetada fazendo com que a torta se torne mais ou menos quebradiça (AROUCA, 2014).

2.5 Metodologia de Seville

A força de remoção das tortas de filtração é possível de ser calculada através de um método desenvolvido por Seville *et al.* (1989) a partir de uma análise do trabalho de Sievert & Loeffler (1987). Neste, foi considerado o comportamento do escoamento do gás no sentido reverso da operação de filtração também chamado de limpeza.

Considerando que a queda total no filtro (ΔP_L) é a diferença entre a pressão de entrada e saída do filtro. Esta ΔP_L é dada pelo somatório das quedas de pressão no tecido e na torta. Inicialmente plota-se um gráfico com as velocidades de limpeza (V_c), que foram preestabelecidas 7, 11, 15,5 cm/s, por a fração de massa retida (γ). Na segunda etapa é plotado um gráfico de queda de pressão na limpeza (ΔP_L), que é encontrado após 60

segundos de limpeza, por a fração de massa retida (γ). Faz a terceira e última etapa que consiste na interação dos valores encontrados nessas etapas por interpolação e plota-se a queda de pressão de limpeza pela velocidade de limpeza através da técnica de regressão linear com o intuito de obter uma curva que represente a variação da queda de pressão na limpeza com as velocidades de limpeza. Essa terceira etapa é ilustrada pela figura 2.

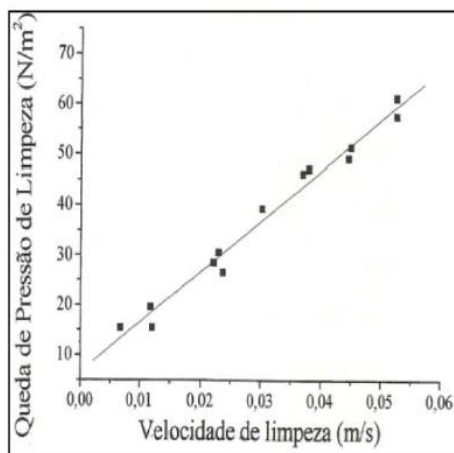


Figura 2. Demonstração da terceira etapa propostas

Fonte: Seville *et al.* (1989) *apud* BARROS (2010).

A reta obtida dessa reta ($y = ax + b$). O coeficiente linear (b) representa a queda de pressão da torta na limpeza e o coeficiente angular (a) representa a resistência específica do meio filtrante. A força de adesão pode ser calculada através da Equação (1).

$$F_C = \sigma_R A \quad (1)$$

Dados que F_C é a força de adesão na interface torta tecido, σ_R é a tensão de remoção da torta de filtração e A área de filtração.

2.6 Método de Rumpf

Rumpf desenvolveu um técnica teórica para o cálculo da tensão normal σ^* e consequentemente a força de adesão aplicada a um aglomerado de partículas com um diâmetro de partícula (dp) específico. A equação 2 mostra esta técnica:

$$\sigma^* = n \cdot F \quad (2)$$

Onde a força média que atua nos pontos de contato é representada por F e n é o número médio de contatos partícula -partícula por unidade de área numa seção transversal do aglomerado, equação 3:

$$n = 1,1 (1 - \varepsilon) \varepsilon^{-1} d_p^{-2} \quad (3)$$

Considerando que o aglomerado é seco e inerte, além de duas esferas de mesmo diâmetro a força de adesão pode ser reescrita e rearranjos é possível calcular a tensão de ruptura do aglomerado dada por Rumpf (σ_{R-R}^*), conforme mostrado na Equação 4:

$$\sigma_{R-R}^* = 0,046 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{H}{d_p a^2} \quad (4)$$

2.7 Método de Kendall *et al.*

Para Kendall *et al.*, existe uma analogia à ruptura de materiais cristalinos e o o número médio de contatos partícula- partícula por unidade de área, então é possível chegar até a equação 5:

$$n = 13,3 (1 - \varepsilon)(1 - \varepsilon)^4 d_p^{-2} \quad (5)$$

Seguindo o mesmo ideal de Rumpf, a tensão de ruptura do aglomerado (σ_{R-K}^*) pode ser calculada pela Equação (6).

$$\sigma_{R-K}^* = 0,554 (1 - \varepsilon)^4 \frac{H}{d_p a^2} \quad (6)$$

Através da força de adesão é possível determinar o valor da distância de separação efetiva entre duas superfícies, conforme é possível observar na equação (7). Esta premissa foi confirmada por Faustino (2010) em que o mesmo calculou a força de adesão pela técnica centrífuga.

$$a = \sqrt{\frac{H d_p}{12 F c}} \quad (7)$$

Em que a é a força de separação efetiva, H a constante de Hamaker e F_c a força de adesão. Para o cálculo da força de adesão utilizando a Equação de Kendall *et al.*, já citada neste trabalho (Equação 6), utilizou-se como valores de distância de separação efetiva e constante de Hamaker (H) os mesmos de Rumpf. Ou seja, adotou como valor da distância de separação efetiva $a = 1,7 \times 10^{-9}$ m dada por Faustino (2010) e constante de Hamaker (H) utilizou-se 8×10^{-20} J para a rocha fosfática e $5,2 \times 10^{-20}$ J para o polvilho doce, conforme Felicetti (2008).

Portanto através do método gráfico de Seville e dos métodos indiretos de Kendall e Rumpf é possível calcular a força de adesão e a distância de separação efetiva.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização dos materiais

Para a caracterização inicialmente foram obtidas imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os tecidos de polipropileno e poliácrlato utilizados nos testes foram fornecidos pela empresa Gino Cacciari LTDA, localizada no estado de São Paulo. Através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) do laboratório de microscopia da faculdade de engenharia química da Universidade Federal de Uberlândia, da marca Carl Zeiss e modelo Evo Maio, foi possível fotografar a estrutura superficial do tecido polipropileno. A figura 3 representa as fotos do MEV.

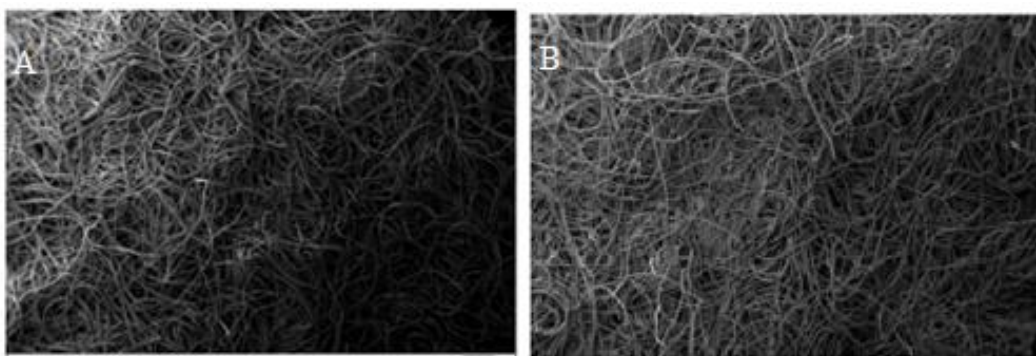


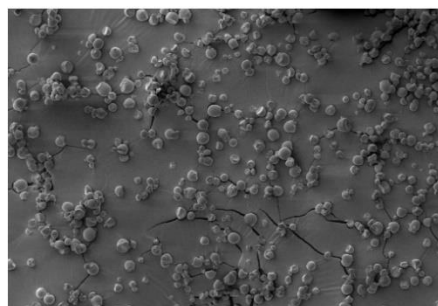
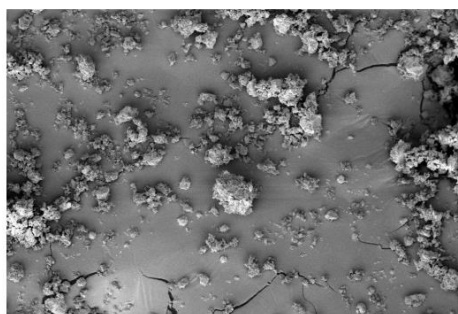
Figura 3. Estrutura superficial do tecido polipropileno (A) e poliácrlato (B)

A análise da distribuição granulométrica dos materiais, rocha fosfática e polvilho, foi feita no equipamento Malven Masterizer Microplus MAF 501 do Laboratório de Caracterização de Partículas da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), utilizando água como solvente conforme

manual, isso se deu tanto para a rocha quanto para o polvilho. Fazendo uso do equipamento Malvern Mastersizer, foi possível definir o diâmetro médio das partículas. Este dado foi utilizado para o cálculo da porosidade das tortas de filtração e, conseqüentemente, os valores de força de adesão, já que o parâmetro de porosidade é necessário para os métodos de Rumpf e Kendall. Fez-se também picnometria a gás hélio com o intuito de descobrir a massa específica da partícula utilizou-se o equipamento ACCUPYC 1330, da Micromeritics da FEQ/UFU. A tabela 01 apresenta os valores encontrados para diâmetro médio de partícula e densidade. As figuras 2 e 3 foram obtidas pelo MEV, mostram a estrutura da rocha fosfática e polvilho. As imagens foram obtidas no Laboratório Multiusuário de Microscopia da FEQUI/UFU por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Carl Zeiss, modelo EVO MA10, utilizando o detector de elétrons secundários.

Tabela 1. Diâmetros médio e massa específica de partícula

Material Particulado	Diâmetro Médio	Massa Específica
Rocha Fosfática	45,964 μm .	2,8301 g/cm ³ (desvio padrão 0,0012 g/cm ³)
Polvilho	12,495 μm .	1,4977 g/cm ³ (desvio padrão 0,0012 g/cm ³)



Figuras 4 e 5. Estrutura da rocha fosfática/ polvilho – 20 μm .

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.2 Cálculo de forças de adesão e distância da separação efetiva

Na Tabela 2 são apresentados os valores de Força e adesão calculados através dos três métodos deste trabalho: Seville, Rumpf e Kendall *et al.*

Tabela 2. Força de adesão por Seville, Rumpf, Kendall e distância de separação efetiva

Materiais	Força de adesão (N) por Seville.	Força de adesão (N) por Rumpf.	Força de adesão (N) por Kendall et al.	Distância de separação efetiva por Rumpf (m)
Rocha fosfática e polipropileno	1,82	1,36 (+/- 0,018)	1,78 (+/- 0,025)	$1,47 \times 10^{-9}$
Rocha fosfática e poliacrilato	2,14	1,60 (+/- 0,0035)	1,99 (+/- 0,013)	$1,47 \times 10^{-9}$
Polvilho e polipropileno	1,80	0,64 (+/- 0,031)	0,30 (+/- 0,017)	$1,01 \times 10^{-9}$
Polvilho e poliacrilato	1,45	0,57 (+/- 0,019)	0,23 (+/- 0,027)	$1,06 \times 10^{-9}$

Na tabela 03 encontra-se os valores da distância de separação efetiva.

Tabela 03. Distância da Separação Efetiva

Materiais	Distância de separação efetiva por Rumpf (m)
Rocha fosfática e polipropileno	$1,47 \times 10^{-9}$
Rocha fosfática e poliacrilato	$1,47 \times 10^{-9}$
Polvilho e polipropileno	$1,01 \times 10^{-9}$
Polvilho e poliacrilato	$1,06 \times 10^{-9}$

4. DISCUSSÃO

Com base na análise da Tabela 2, verifica-se que os valores de força de adesão obtidos para a rocha fosfática foram superiores aos encontrados para o polvilho. Além disso, o filtro de polipropileno apresentou valores de força de adesão maiores em comparação ao poliacrilato. Essa diferença pode ser atribuída à morfologia dos materiais particulados: enquanto o polvilho possui formato mais esférico, a rocha fosfática apresenta irregularidades em sua estrutura. Arouca (2014) argumenta que a maior abertura superficial e a permeabilidade do tecido de poliacrilato explicam as diferenças nos valores observados.

Os valores de força de adesão da rocha fosfática apresentaram maior consistência

entre os três métodos utilizados, em comparação ao polvilho, que apresentou maior divergência nos resultados, especialmente quando analisados pelo método gráfico de Seville e pelas equações de Kendall e Rumpf. Tal variação pode ser atribuída aos parâmetros adotados nessas equações, destacando-se a dificuldade de determinar a distância de separação efetiva entre as partículas (AROUCA, 2010). Barros (2010), além de calcular a força de adesão pelo método de Seville, utilizou os valores dessa força para determinar a distância de separação efetiva para cada material estudado.

Coury e Aguiar (1983), Arouca (2014) e Nunes (2017) investigaram a aplicabilidade da equação de Rumpf para remoção de tortas de filtração de gases. Esses autores verificaram que, embora o sistema estudado não fosse ideal — com partículas esféricas e de diâmetro uniforme —, a equação mostrou-se útil no desenvolvimento de técnicas de limpeza para filtros de tecido. Eles consideraram que as forças de Van der Waals eram as únicas significativas, alcançando resultados similares aos experimentais do método gráfico de Seville *et al.* A teoria de Rumpf foi, portanto, empregada para analisar os resultados experimentais da força de adesão por unidade de área.

A proximidade entre as partículas está relacionada à compactação da torta, o que exige maior força para sua remoção. Assim, a distância de separação efetiva entre as partículas determina o grau de compressibilidade da torta (BARROS, 2010). Seguindo essa abordagem, a Tabela 3 apresenta os valores de distância de separação efetiva para a rocha fosfática e o polvilho em contato com os tecidos de polipropileno e poliácrlato, com base nos dados de força de adesão calculados pelo método gráfico. De acordo com Schubert (1981) *apud* Arouca (2014), a menor distância entre partículas esféricas e lisas seria de 4×10^{-10} m, enquanto para partículas reais, a faixa estimada seria entre 4×10^{-10} e 4×10^{-8} m. Os resultados experimentais confirmaram que os valores da distância efetiva para a rocha fosfática e o polvilho com os dois tipos de tecidos estão dentro dessa faixa.

Cirqueira *et al.* (2017) investigaram o desempenho de meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso, analisando a eficiência de limpeza e a regeneração dos tecidos. Os resultados indicaram que o filtro de polipropileno apresentou maior permeação, resistência específica e eficiência de limpeza em comparação ao poliácrlato, sob as mesmas condições operacionais. No presente estudo, a resistência específica do poliácrlato foi maior que a do polipropileno, o que pode ser explicado pelas condições operacionais, especialmente pela baixa variação de pressão (20 cmH₂O). Felicetti (2008) verificou que a força de adesão aumenta com o incremento do diâmetro médio das

partículas. Essa observação foi confirmada experimentalmente, pois a força de adesão da rocha fosfática foi maior em ambos os tecidos, enquanto seu diâmetro médio é significativamente superior ao do polvilho. Barros (2010) determinou a força de adesão com diferentes massas de pó no filtro, verificando valores superiores para a rocha fosfática em relação ao polvilho, tanto no filtro de polipropileno quanto no de poliácrlato. Arouca (2014), ao trabalhar com força de adesão sem vibração mecânica, encontrou valores de 0,25 N para o polvilho doce e 2,23 N para a rocha fosfática, com uma variação de pressão de 50 cmH₂O. As diferenças operacionais, como pressão, fração de massa retida, diâmetro das partículas e características do meio filtrante, justificam as variações observadas. Contudo, a tendência geral foi consistente, com maior força de adesão no polipropileno como filtro e na rocha fosfática como pó. Barros (2010) e Rodrigues (2004) também calcularam a distância de separação efetiva utilizando a equação de Rumpf. Esses autores relataram que a distância de separação efetiva é diretamente influenciada pela porosidade, vazão mássica, viscosidade do gás, velocidade de filtração e outras condições operacionais. Felicetti (2008) utilizou a técnica centrífuga para determinar a força de adesão e verificou que condições operacionais diferentes resultam em valores distintos tanto para a força de adesão quanto para a distância de separação efetiva.

Os resultados gerais indicam que as forças de adesão são influenciadas por variáveis como pressão, diâmetro de partículas, fração de massa retida e propriedades dos meios filtrantes. As tendências observadas, com maior força de adesão no filtro de polipropileno e na rocha fosfática, estão em conformidade com estudos anteriores. Além disso, o comportamento experimental reforça a eficácia da equação de Rumpf e do método gráfico de Seville como ferramentas para avaliar e otimizar processos de filtração em indústrias.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se a filtração e a análise da força de adesão utilizando materiais fosfáticos e polvilho em filtros de polipropileno e poliácrlato, com variação de pressão de 20 cmH₂O. Os resultados indicam que pequenas variações de pressão na torta permitem determinar a porosidade e a força de adesão no processo de filtração. Os três métodos de cálculo da força de adesão apresentaram resultados coerentes com a realidade, considerando suas limitações. As dificuldades concentraram-se na quantificação da distância de separação efetiva nos métodos de Rumpf e Kendall et al., enquanto o método de Seville mostrou-se mais preciso por basear-se em dados experimentais e representação gráfica. Através do

método de Seville se obteve a maior força de adesão para os quatro testes (combinação de rocha fosfática e polvilho com filtros de poliácrlato e polipropileno). Com a rocha fosfática os valores encontrados foram mais próximos quando comparados ao polvilho. A tendência do comportamento dos valores de força de adesão e distância de separação efetiva seguiram os resultados encontrados na literatura, as diferenças entre os mesmos existiram uma vez que as condições operacionais não eram iguais. No entanto a força de adesão e a foram maiores para os filtros de polipropileno e rocha fosfática. Os cálculos da distância efetiva de separação quando utilizando os resultados de força de adesão pelo método de Seville e de Rumpf estão compreendidos na faixa de $4 \cdot 10^{-10}$ e $4 \cdot 10^{-8}$ m, comprovando que a tensão de remoção obtida experimentalmente foi coerente.

REFERÊNCIAS

- AROUCA, A. M. M. **Efeito da vibração mecânica perpendicular na formação e remoção de tortas de filtração de aerossol**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2014.
- BARROS, E. A.; BARBOSA, T. A.; MENDONÇA, L. C. Estimativa de créditos de carbono nas estações de tratamento de esgotos (ETE) da Grande Aracaju/Sergipe. **Revista Cereus**, v. 16, n. 1, 2024.
- BARROS, P. M. **Estudo da força de adesão de tortas de filtração de gases em diferentes condições operacionais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- BARBOSA, A. P. M.; MARIA, L. dos S.; SOUSA, R. B. de. Proposta de implementação de plano de gerenciamento de resíduos químicos em laboratórios de ensino no Norte do Tocantins. **Revista Cereus**, v. 16, n. 2, 2024.
- CIRQUEIRA, S. S. R. **Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- COURY, J. R.; AGUIAR, M. L. Aspectos estruturais de aglomerados de partículas finas. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. (orgs.). **Tópicos especiais em sistemas particulados**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1983. p. 245-281.
- FARGNOLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.
- FAUSTINO, P. B. **Determinação experimental da força de adesão entre partículas e metais filtrantes constituídos de celulose**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade

Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2010.

FELICETTI, M. A. **Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicando a técnica centrífuga**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2008.

MARQUES, F. B. **Investigação de design de filtro manga através da técnica de CFD**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia, Tecnologia e Gestão) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2017.

MAO, N. Engineering design of high-performance filter fabrics. In: **Engineering of High-Performance Textiles**. The Textile Institute Book Series. p. 435–488, 2018.

NUNES, D.; ALVAREZ, F. F. G.; CERON, L. P.; PARREIRA, F. M. C. Estudo de formação e remoção de tortas de filtração em não tecidos. **Revista Meio Filtrante**, v. 58, p. 22–27, São Paulo, 2012.

NUNES, D. M. **Estudo sobre o efeito de vibrações axiais sobre a formação e remoção de tortas de filtração gás-sólidos**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE (OMS). **Relatório global da OMS**. Genebra: OMS, 2021.

PETEAN, P. G. C.; AGUIAR, M. L. Determining the adhesion force between particles and rough surfaces. **Powder Technology**, v. 274, p. 67–76, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.047>.

RODRIGUES, A. C. M. **Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

SOUZA, F. M. N.; SILVA, C. E.; AGUIAR, M. L. A análise de risco como instrumento para sistemas de gestão ambiental. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 3, n. 1, p. 18–41, Aquidabã, 2012.

TANABE, E. H. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões**. 2011. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

TIENI, E. F. **Filtração de gases: estudo do fenômeno da limpeza por blocos**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

TOGNETTI, E. R. **Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.