

### SISTEMA DE FILTRAÇÃO DE GASES COM LIMPEZA POR VIBRAÇÃO LONGITUDINAL AO FLUXO

AUTORES: DEIVID MARQUES NUNES\*, DR. LUCIANO PESKE CERON\*\*, DR. FÁBIO DE OLIVEIRA AROUCA\*, DR. JOÃO JORGE RIBEIRO DAMASCENO\*, LUCAS CAMARGOS BORGES\*, JOÃO MAURO ALVES LIMA BRITO\*'

marques.ep@gmail.com; luciano.ceron@pucrs.br; foarouca@gmail.com; jjrdamasceno@gmail.com; lucascamargosborges@gmail.com; joaomauroalveslimabrito@gmail.com

\*UFU - Faculdade de Engenharia Química \*\*PUCRS - Faculdade de Engenharia Química

### **RESUMO**

Este trabalho propõe a adaptação de um sistema de filtração de gases, que utilizou um motor de vibração acoplado em direção longitudinal ao fluxo gasoso, para verificar a influência da vibração na formação e remoção das tortas de particulados de rocha fosfática moída. Utilizou-se como meio filtrante, o filtro acrílico, velocidade de filtração de 0,10 m/s e queda de pressão máxima de 10000 Pa. Foram avaliados os efeitos em várias frequências (baixa, média e alta) com resposta dos parâmetros da torta de filtração em função do tempo, massa de pó acumulada por unidade de área. Pôde-se concluir que as frequências de vibração de 12, 17 e 18 Hz apresentaram diferenças estatísticas significativas e influenciaram na formação e remoção de tortas de filtração.

#### **1. FILTRAÇÃO DE GASES**

A operação de filtração de gases consiste basicamente na passagem de um fluxo de ar contaminado com material particulado através um meio filtrante poroso que captura as partículas permitindo a passagem de fluxo limpo. Trata-se de uma das operações de filtração mais antiga, de baixo custo, fácil operação



e de alta eficiência de coleta para ampla faixa de distribuição granulométrica (CAMPOS; AGUIAR, 2009). A medida que se realiza a operação de filtração de gases, o material particulado suspenso na corrente de ar se acumula no meio filtrante e forma uma camada de pó denominada de torta de filtração. Inicialmente, o meio filtrante é o principal coletor das partículas que se aderem nos interstícios das fibras. Com o decorrer da filtração, há formação das tortas de pó, que se tornam os principais coletores do material particulado presente na corrente gasosa. A Figura 1 ilustra a operação de filtração de gases.

A permeabilidade é uma propriedade do meio filtrante definida como a facilidade em que um fluido submetido a um gradiente de pressão ultrapassa os poros de sua superfície, no qual gera uma perda de energia que é refletida por um diferencial de pressão na entrada e saída do meio filtrante (INNOCENTINI et al., 1999). A permeabilidade pode ser determinada através de equações que quantificam a resistência do meio filtrante ao escoamento do gás para baixas velocidades em meios porosos granulares, homogêneos e incompressíveis e para fluidos compressíveis em que a queda de pressão descreve uma relação não linear com a velocidade superficial de filtração.

A relação empírica para a determinação da permeabilidade de acordo com Darcy pode ser calculada pela Equação 1:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{k_1} V_f \tag{1}$$

Torta de Filtração Fluxo gasoso com particulas

www.abgct.com.br

Figura 1. Esquema da operação de filtração de gases.

Onde  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  espessura do meio filtrante,  $K_1$  permeabilidade darciana,  $V_f$  velocidade de filtração e  $\mu_a$  viscosidade do gás.

A Equação de Forchheimer é composta pelos termos de forças viscosas e forças inerciais, respectivamente, e pode ser determinado pela Equação 2:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_{\varepsilon}}{k_1} V_f + \frac{\rho_{\varepsilon} V_f^2}{k_2} \tag{2}$$

Sendo  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  a espessura do meio filtrante,  $K_2$  a permeabilidade não darciana,  $V_f$  a velocidade de filtração,  $\mu_g$  a viscosidade do gás e  $P_g$  a densidade do gás.

O comportamento ideal dos ciclos de filtração considera uma compactação uniforme da torta de filtração, com fluxos e concentrações de pó constantes e limpeza uniforme. Isso leva a ciclos de filtração uniformes em que o tempo de filtração do ciclo é igual ao tempo de filtração no tecido virgem. Devido à presença de uma camada fina de pó, com espessura uniforme após a operação de limpeza do tecido há o aumento da perda de carga residual (ROCHA, 2010). A operação de filtração é cíclica, ou seja, considera-se um ciclo de filtração após uma filtração e uma remoção da torta de filtração. Após a regeneração do tecido realiza-se uma nova filtração. A Figura 2 ilustra o comportamento ideal dos ciclos de filtração.

A queda de pressão ou perda de carga no meio filtrante é dependente de sua permeabilidade, da velocidade de filtração e da viscosidade do gás. Já a queda de pressão na torta de filtração é dependente da área de concentração das partículas, da velocidade de filtração e da resistência específica da torta (SALEEM; KRAMMER, 2007).

Figura 2. Comportamento ideal dos ciclos de filtração



Dessa forma, a queda de pressão total em um sistema de filtração pode ser definida como a soma das quedas de pressão no meio filtrante,  $\Delta P_m$  e na torta formada,  $\Delta P_c$ . Logo, a pressão total é estimada pela Equação 3:

$$\Delta P_{T} = \Delta P_{m} + \Delta P_{c} \tag{3}$$

Há medida que se deposita material particulado no tecido para a formação da torta de pó, a queda de pressão no tecido aumenta. O comportamento da queda de pressão no meio e na torta de filtração pode ser obtido através da teoria darciana, considerando baixos valores de Reynolds (LICHT, 1988). A Equação 4 descreve a queda de pressão total no sistema de filtração.

$$\Delta P_T = k_m V_f + k_c V_f W \tag{4}$$

Onde  $K_m$ é a resistência específica do meio filtrante,  $V_f$ é a velocidade superficial de filtração,  $K_c$ é a resistência específica da torta de filtração e Wé a massa de pó acumulada por unidade de área.

Dividindo-se a Equação 4 pela velocidade superficial de filtração de arraste chega-se a Equação 5, que define o arraste do filtro (S) como a perda de carga por unidade de velocidade de filtração, ou seja, corresponde a resistência do filtro (RODRIGUES, 2006).

$$\frac{\Delta P_T}{V_f} = \dot{\kappa}_m + \dot{\kappa}_c W \tag{5}$$

Onde  $K_c$  é a resistência específica da torta de filtração e W é a massa de pó acumulada por unidade de área e  $\frac{\Delta P_T}{V_c} = s$  é o arraste do filtro.

Figura 3. Queda de pressão em função de pó acumulada (SONG, 2006).



O processo de formação das tortas de filtração em não tecidos filtrantes, Figura 3, acontece em três distintos estágios nos ciclos de filtração, sendo: filtração de profundidade, área de transição e filtração superficial formando a torta de filtração (KANAOKA *et al.*, 2006).

Com a formação da torta de filtração, tem-se a terceira etapa denominada filtração superficial, em que a própria torta de filtração passa a ser o principal meio de captura de partículas. Neste sentido é capaz de remover as partículas mais finas da corrente gasosa por peneiramento, ou pelos mecanismos de captura e, o meio filtrante, passa atuar como suporte para a torta de filtração.

A curva de filtração com concavidade para baixo ocorre quando há deposição inicial das partículas no interior do meio filtrante, com ciclo de filtração com rápida formação de torta de filtração. O comportamento linear indica uma deposição inicial superficial das partículas no meio filtrante de forma uniforme, ou seja, sem penetração de pó no tecido. A concavidade para cima indica que há um maior período de filtração de profundidade, com formação da torta de filtração mais lenta. Esse tipo de curva ocorre quando a torta de filtração já foi formada e removida parcialmente. A remoção parcial da torta denomina-se de *Patchy Cleaning*. A Figura 4 representa os três comportamentos da curva de filtração.

Os parâmetros de projetos mais importantes para filtração de gases são apresentados na Tabela 1, com seus respectivos valores, segundo Matteson (1987).

**Figura 4.** Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração (TANABE, 2008).





**Tabela 1.** Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases.

Velocidade dos gases	0,8 a 10 cm/s	
Queda de pressão do não tecido limpo	60 a 200 Pa	
Queda de pressão máxima de operação	500 a 2500 Pa	
Concentração de pó	0,1 a 100 g/cm <sup>3</sup>	
Massa de pó depositada por unidade de área	200 a 2000 g/m²	
Eficiência de coleta	99,90 a 99,99 %	

### 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos testes com vibração mecânica no sistema de filtração de gases, Figura 5, o motor excêntrico era acionado através de um inversor de frequência logo após a velocidade de filtração utilizada ser atingida. O pó sugado pelo tubo de Venturi era disperso na linha que o levava até a caixa de filtração através da sucção do soprador. A operação de filtração era interrompida após atingir a queda de pressão máxima pré-estabelecida. Os testes em equipamento de filtração de gases foram realizados no Laboratório de Separação Gás-Sólido da Universidade Federal de Uberlândia.

Para a realização de um teste experimental foi necessário fazer a filtração de gás até atingir a queda de pressão estabelecida e em seguida fazer a limpeza do meio filtrante. Esse procedimento caracterizava um ciclo de filtração de gases. A Tabela 2 apresenta uma descrição sumária das condições experimentais adotadas na execução dos testes de filtração de gases.

**Figura 5.** Sistema de filtração de gases com: (1) vibração contracorrente ao fluxo gasoso(2) mesa de vibração (3) vibração perpendicular ao fluxo gasoso e (4) inversor de frequência.



Vibração perpendicular ao fluxo gasoso





Tabela 2. Condições dos experimentos

Não Tecido	Ρό	Velocidade de Filtração (cm/s)	Velocidade de Limpeza (cm/s)	ΔPmáximo (cm H <sub>2</sub> O)	Mecanismo de Limpeza	Umidade Relativa do Ar (%)
Acrílico	Rocha fosfática moída	10	7, 11 e 15,5	100	Fluxo de Ar Reverso	< 20

O material particulado de rocha fosfática foi disponibilizado pela empresa Vale Fertilizantes, Pato de Minas/MG. Este material foi escolhido devido apresentar compatibilidade com a unidade experimental de filtração de gases. A distribuição granulométrica da rocha fosfática foi realizada em equipamento Malvern Mastersizer Microplus MAF 5001, via úmida.

O não tecido agulhado utilizado nos experimentos foi o produto 7002AC da Gino Cacciari Ltda, São Paulo/SP, 100% acrílico (poliacrilonitrila copolímero) de 550 g/m<sup>2</sup> e 2,2mm de espessura, com tratamentos de chamuscagem e calandragem em um dos seus lados, com o intuito de facilitar o desprendimento das tortas de filtração. A caracterização do não tecido e material particulado foram realizados por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), modelo Evo Maio e marca Carl Zeiss, no Laboratório de Microscopia da Universidade Federal de Uberlândia.

O meio filtrante acrílico foi cortado em seção circular com as dimensões compatíveis da caixa de filtração e após controlar a velocidade de filtração através de uma placa de orifício, previamente calibrada acoplada ao manômetro tubo em U, iniciava-se a operação de filtração de gases para cada faixa de frequências de vibração, faixa baixa (5, 6 e 7 Hz), média (12, 13 e 14 Hz) e alta (17, 18 e 19 Hz) nas respostas dos parâmetros da torta de filtração em relação ao tempo de filtração (s), massa de pó acumulada por unidade de área (kg/m<sup>2</sup>)..

Na operação de limpeza do meio filtrante, utilizouse o mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso, que consiste na passagem de fluxo gasoso no sentido inverso ao da filtração.

Os valores da velocidade de filtração foram adotados de acordo com as características da unidade experimental e de trabalhos encontrados na literatura. O valor da velocidade de filtração está de acordo com os parâmetros de projeto mais utilizados em filtração de gases, segundo Mattenson (1987), cuja velocidade do fluido deve estar entre 0,8 e 10 cm/s. Os ensaios de filtração foram realizados com queda de pressão máxima de 10000 Pa e com vazão mássica de 0,183 g/s de rocha moída.

#### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO 3.1. Meio Filtrante

A estrutura superficial do não tecido de acrílico foi fotografada utilizando o Microscópico Eletrônico de Varredura (MEV), apresentada na Figura 6.

Através da Figura 6, pode-se verificar que o não tecido acrílico apresenta uma estrutura superficial fechada e emaranhada e com alto número de pontos quentes (*hot spots*), resultantes dos processos de calandragem e chamuscagem, na qual as fibras da superfície são fundidas pelo calor do tratamento, resultando em pontos fechados na superfície do tecido.

#### 3.2. Material Particulado

A estrutura dos particulados de rocha fosfática moída é apresentada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) na Figura 7. A caracterização do formato das partículas de rocha fosfática moída em relação à circularidade foi de 0,60. A circularidade quantifica o

Figura 6. Estrutura superficial do meio filtrante acrílico.





quanto o formato da partícula projetada se aproxima de um círculo perfeito. Pode ser determinada pela relação entre o perímetro de um círculo, de mesma área da partícula de interesse, dividido pelo perímetro da imagem da partícula. A circularidade varia entre 0 e 1, na qual, o círculo perfeito tem circularidade 1.

A Figura 8 apresenta a distribuição granulométrica da rocha fosfática moída nas tortas de filtração e na alimentação, conforme a análise realizada no Malvern Mastersizer.

Figura 7. Microscopia eletrônica de varredura do particulado de rocha fosfática moída.

#### 3.3. Tempo de Filtração

Nas Figuras 9, 10 e 11 são mostrados os tempos de filtração em função da queda de pressão máxima de 10000 Pa para as faixas baixa, média e alta, respectivamente com o objetivo de verificar se havia alguma relação entre o tempo de filtração e as freguências de vibração, ou seja, analisar se as frequências maiores proporcionavam maior tempo ou se as baixas frequências um menor tempo de filtração em relação ao sistema estático.



Figura 9. Queda de pressão em função do tempo de filtração para a faixa baixa (f: 5, 6 e 7 Hz) em comparação ao sistema estático (f: 0 Hz).



Figura 8. Distribuição granulométrica média da rocha fosfática moída.

**Figura 10.** Queda de pressão em função do tempo de filtração para a faixa média (f: 12, 13 e 14 Hz) em comparação ao sistema estático (f: 0 Hz).



**Figura 11.** Queda de pressão em função do tempo de filtração para a faixa alta (f: 17, 18 e 19 Hz) em comparação ao sistema estático (f: 0 Hz).



Inicialmente, foi possível observar que as frequências de vibração para todas as faixas, baixa, média e alta proporcionaram menores tempos de filtração do que sistema estático (0Hz), com exceção da frequência de 17 Hz que apresentou pouco maior que o sistema estático. Porém, não foi possível identificar um padrão de comportamento entre as variáveis frequências de vibração e tempo de filtração. Isso quer dizer que, as frequências de maiores valores não proporcionaram maiores tempos de filtração e nem as baixas frequências menores tempos de filtração em relação ao sistema estático, ambas apresentaram valores próximos ao sistema isento de vibração, sendo um ganho em tempo de 3,28 % para a frequência de 17 Hz e uma redução máxima encontrada de 7,89 % para as frequências de 6 e 12 Hz.

### DIVULGUE O SEU TRABALHO.



### PUBLIQUE SEU ARTIGO TÉCNICO NA REVISTA QUÍMICA TÊXTIL.

A revista **QUÍMICA TÊXTIL** é distribuída para mais de **3.000** empresas, as quais são direcionadas ao setor técnico, é o veículo mais objetivo para divulgar seus trabalhos diretamente aos profissionais do setor.

A Diretoria da ABQCT acredita que, após mais de trinta e cinco anos circulando e levando artigos técnicos de grande interesse para os profissionais do nosso setor de atuação, a revista "Química Têxtil" precisa e merece ter melhor classificação junto ao CAPES.

Para incrementar essa avaliação e como primeiro passo nesse sentido, pretendemos criar um **CORPO EDITORIAL** que cuidará da escolha dos artigos científicos e técnicos, encaminhando todo o material para professores universitários que farão a devida revisão e possíveis correções mantendo um estreito relacionamento junto aos autores.

> ENVIE SEU ARTIGO PARA: abqct@abqct.com.br



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE QUÍMICOS E COLORISTAS TÊXTEIS

www.abqct.com.br

Arouca (2014), nos estudos de filtração realizados com vibração mecânica perpendicular ao fluxo gasoso, verificou que não houve um padrão de comportamento entre a frequência de vibração e a variável tempo de filtração.

#### 3.4. Carga Mássica

As Figuras 12, 13 e 14 representam a média das curvas da queda de pressão em função das médias da massa de pó acumulada por unidade de área para o sistema estático e o sistema submetido às vibrações mecânicas classificadas nas faixas de baixa (f: 5, 6 e 7 Hz), média (12, 13 e 14 Hz) e alta (f: 17, 18 e 19 Hz).

As linhas tracejadas representam o ponto de colmatação que correspondem ao acúmulo de pó necessário para o início da formação da torta e consiste no lugar geométrico obtido para o cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas em que é obtida a massa de pó necessária para a formação da torta, segundo Wash (1996).

Figura 12. Massa de pó acumulada por unidade de área em função da queda de pressão para a faixa de frequências de vibracão baixa.



Figura 13. Massa de pó acumulada por unidade de área em função da queda de pressão para a faixa de frequências de vibracão baixa.









Observa-se que as curvas de filtração apresentaram um comportamento típico da operação de filtração de gases com a concavidade da curva voltada para cima, o que indicou a etapa de filtração de profundidade. Posteriormente, percebeu-se uma linearidade da curva caracterizada como etapa de filtração de transição em que há a formação dos dendritos que consistem em estruturas aglomeradas de partículas no interior do tecido que atuam como os novos elementos coletores (RODRIGUES, 2006; NUNES, 2011).

A formação desses aglomerados proporciona um aumento da taxa de queda de pressão e diminuição da penetração das partículas no tecido. Com a formação dos dendritos têm-se uma camada superficial de material particulado, denominada de torta de filtração. Após a torta formada tem-se a última etapa da filtração conhecida como filtração superficial, em que a própria torta é o novo elemento de coleta de partículas (TA-NABE, 2008). A inversão da concavidade no final dos ensaios de filtração nas Figuras 12, 13 e14, para baixo, representa uma rápida formação da torta e um rápido aumento da queda de pressão.

Na Figura 12 é possível observar que as curvas de filtração para as frequências de 6 e 7 Hz apresentaram a mesma quantidade massa acumulada por unidade de área necessária para o início da formação da torta, sendo de 0,075 kg/m<sup>2</sup> e para a frequência de 5 Hz, um acúmulo de, aproximadamente, 0,070 kg/m<sup>2</sup>. Isso quer dizer que a frequência de 5 Hz proporcionou ao sistema uma maior perda de carga para que a torta começasse a se formar.

Esse comportamento foi observado por Arouca (2014) para as frequências de 5 e 7 Hz, para queda de pressão máxima de 4903 Pa e justificou-se que a frequência, provavelmente, proporcionou um rearranjo na acomodação das partículas no interior do tecido, fazendo com que acelerasse sua saturação em relação ao sistema estático.



### FILTRAÇÃO



As frequências de vibração da faixa média de 12 e 14 Hz e da faixa alta de 19 Hz também apresentaram comportamento semelhante ao sistema estático com a mesma quantidade de acúmulo de pó necessária para o início da formação da torta. Já para as frequências de 13, 17 e 18 Hz mostraram pontos de colmatação inferiores ao sistema estático, semelhantemente, à frequência de 5 Hz.

A diferença dos pontos de colmatação foi baixa, pois as frequências de 0, 6, 7, 12, 14 e 19Hz tiveram pontos de colmatação de 6,33% maiores que as frequências de 5, 13, 17 e 18Hz. Segundo Arouca (2014), o motivo para que essas frequências apresentassem comportamentos semelhantes entre si, está relacionado ao comportamento do motor vibrador, que justificou esse fato, devido o movimento periódico do motor de vibração ser composto por séries de movimentos harmônicos simples, sendo cada um desses movimentos descritos por uma função senoidal. Isso quer dizer que, uma frequência mais baixa levava a resultados a um ajuste semelhante ao ajuste dos resultados obtidos a partir de uma frequência mais alta.

### 4. CONCLUSÕES

Inicialmente, constatou-se que as frequências de vibração para todas as faixas de baixa, média e alta proporcionaram menores tempos de filtração do que sistema estático. Porém, as frequências de maiores valores não proporcionaram maiores tempos de filtração e nem as baixas frequências menores tempos de filtração e nem as baixas frequências menores tempos de filtração e nem relação ao sistema estático, ambas apresentaram valores próximos ao sistema isento de vibração.

As curvas de filtração apresentaram um comportamento típico da operação de filtração de gases com a concavidade da curva voltada para cima, o que caracteriza filtração de profundidade com particulados de rocha fosfática.

As frequências de 0, 6, 7, 12, 14 e 19 Hz apresentaram pontos de colmatação discretamente superiores ao sistema estático. Os pontos de colmatação semelhantes entre si estão relacionados ao comportamento motor vibrador em que apresenta movimentos periódicos compostos por séries de movimentos harmônicos simples descritos por função senoidal.

As vibrações mecânicas com frequências de 12, 17e 18 Hz causaram a formação de tortas com menores espessuras que o sistema estático, devido ao maior empacotamento das partículas nos interstícios das fibras.