

# FILTRAÇÃO DE PARTICULADOS FOSFÁTICOS EM NÃO TECIDOS EM UMA UNIDADE EXPERIMENTAL DE ÂMBITO INDUSTRIAL

### Autores:

**Deivid Marques Nunes** - deivid\_ep@hotmail.com  
Doutorando em Engenharia Química - UFU - Faculdade de Engenharia Química

**Luciano Peske Ceron** - luciano.ceron@pucrs.br  
Dr. Engenharia de Materiais - PUCRS - Faculdade de Engenharia Química

**Dr. Fábio de Oliveira Arouca** - foarouca@gmail.com  
Dr. Engenharia Química - UFU - Faculdade de Engenharia Química

**Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno** - damasceno@feq.ufu.br  
Dr. Engenharia Química - UFU - Faculdade de Engenharia Química

**Revisão técnica:** Rafael Ramos

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi construir um sistema de filtração de gases e estudar a influência das variáveis operacionais na formação e remoção de tortas de filtração com particulado fosfático, em filtros de não tecidos de acrílico, poliéster e polipropileno. Os ensaios foram realizados com o intuito de determinar a resistência específica e a permeabilidade dos materiais e o desempenho na formação e remoção das tortas de filtração em relação à variação da queda de pressão máxima e da velocidade de filtração

lor máximo estabelecido de acordo com as condições de operação e condições econômicas – tornando necessária a remoção periódica da camada de pó formada.

A escolha do não tecido a ser utilizado nas operações de filtração é uma decisão fundamental para a obtenção de alta eficiência de coleta de partículas no filtro e seu desprendimento. Com isso, a seleção dos tecidos depende da compatibilidade com o material particulado (concentração, distribuição de tamanhos, abrasividade, energia de absorção), com o gás transportador (temperatura, umidade, alcalinidade e acidez) e com o custo relativo do material (BARNETT, 2000).

## INTRODUÇÃO

A filtração de gases utilizando os filtros de manga, industrialmente conhecidos, apresenta uma aplicação, há muitos anos, na separação de partículas em suspensão. A sua aplicação tornou-se predominante a partir da criação de filtros de tecidos sintéticos devido a algumas de suas características físicas, como alta eficiência de coleta, baixo custo, alta resistência mecânica, química, menor diâmetro de fibras e também por suportar elevadas temperaturas (DONOVAN, 1985).

O princípio de funcionamento dos filtros de tecido consiste na separação mecânica das partículas pelo escoramento do material particulado através do tecido e, após um determinado período, pela camada de pó depositada em sua superfície denominada torta de filtração (DICKENSON, 1994). A queda de pressão no meio filtrante consiste em uma importante variável para o desempenho dos meios filtrantes, pois aumenta à medida que aumenta também a espessura da torta de filtração, atingindo o va-

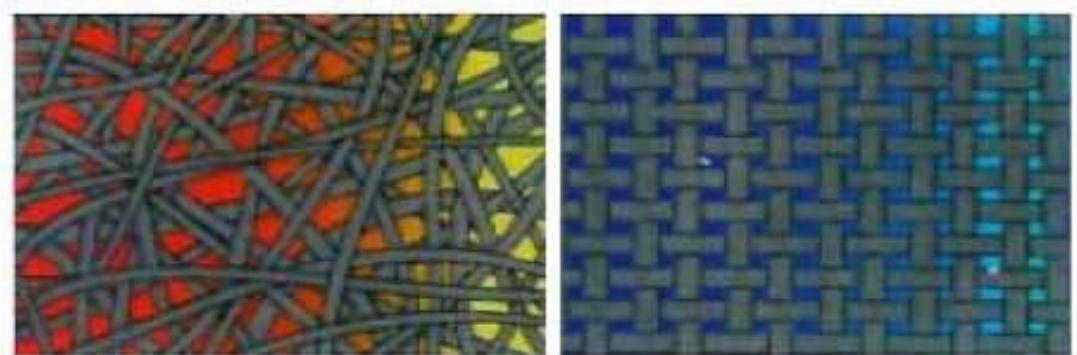
## FILTRAÇÃO DE GASES

A operação de filtração de gases consiste na passagem de um fluxo gasoso carregado com material particulado através de um meio filtrante que tem como finalidade reter as partículas presentes na corrente gasosa, resultando na saída de um fluxo gasoso limpo. Com o decorrer da filtração, essas partículas se acumulam sobre o não tecido e umas sobre as outras, tornando uma camada porosa mais espessa (torta de filtração) que passa a desempenhar a função de meio filtrante. Torna-se necessária a remoção da torta, pois ela aumenta progressivamente a queda de pressão no sistema, incrementando os custos energéticos da indústria (DONOVAN, 1985). Os parâmetros de projeto na filtração de gases mais importantes são apresentados na tabela 1, com seus respectivos valores, segundo MATTESON (1987) apud SILVA (2008).

*Figura 3:- O espectro eletromagnético*

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/m <sup>2</sup>
Eficiência de coleta	99,90 a 99,99 %

O não tecido é um têxtil com distribuição aleatória das fibras, ou seja, sem um entrelaçamento ordenado e homogêneo dos fios, como mostrado na figura 1-a. Com características diferentes de um tecido trançado (figura 1-b), no qual o conjunto de fios faz um ângulo próximo de 90° em forma de lâmina flexível (MORONI, 2005).



## PERDA DE CARGA

A queda de pressão é um parâmetro fundamental na operação de filtração porque é responsável em determinar a frequência de limpeza do meio filtrante, além de determinar a potência requerida pelo sistema de filtração (JEON; JUNG, 2004) e apud (ROCHA, 2010). É definida como a soma das quedas de pressão no meio filtrante,  $\Delta P_m$ , na torta formada  $\Delta P_c$  e na estrutura do filtro de manga  $\Delta P_s$ . Como esta é muito baixa, pode-se considerá-la desprezível. Logo, a pressão total é estimada pela equação (2).

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_c + \Delta P_s$$

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_c$$

O processo de filtração de gases geralmente ocorre a baixos valores de número de Reynolds, ou seja, em escoamento laminar (LICHT, 1998). Assim, o comportamento da queda de pressão no meio filtrante em relação à velocidade superficial do fluido pode ser obtido através da Lei de Darcy.

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \alpha_m \mu_g V_f$$

em que  $L_m$  é a espessura do meio filtrante,  $\mu_g$  é a viscosidade do gás,  $\alpha_m$  é o coeficiente de resistência viscosa do meio filtrante,  $V_f$  é a velocidade superficial de escoamento do gás e  $\Delta P_m$  é a queda de pressão no meio filtrante. O termo  $\frac{1}{\alpha_m \mu_g}$  é o coeficiente de permeabilidade do meio filtrante ( $B_m$ ), que é constante para o escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis em meios porosos. Assim:

$$\Delta P_m = \frac{L_m V_f}{B_m}$$

Assim,  $\frac{L_m}{B_m}$  é a resistência do meio filtrante (km), que é diretamente proporcional à queda de pressão e se relaciona de forma linear entre esta e a velocidade superficial de filtração:

$$\Delta P_m = k_m V_f$$

A queda de pressão através da camada de pó, diferentemente do que ocorre com o meio filtrante, a espessura da torta ( $L_c$ ) varia com o tempo de filtração.

Conforme Aguiar (1991) é possível determinar tal espessura através da seguinte equação:

$$L_c = \frac{W}{\rho_p (1 - \varepsilon)}$$

em que  $W$  é a massa de pó depositada por unidade de área por unidade de tempo,  $\rho_p$  é a densidade das partículas sólidas e  $\varepsilon$  é a porosidade da torta de filtração ou fração de vazios da torta. Substituindo esta equação na Lei de Darcy tem-se:

$$\Delta P_c = \frac{W V_f}{[\rho_p (1 - \varepsilon)] B_c}$$

em que  $B_c$  é o coeficiente de permeabilidade da torta. Fazendo

$$\kappa_c = \frac{1}{[\rho_p (1 - \varepsilon)] B_c}$$

, a resistência específica da torta. Substituindo as equações (5) e (7) na Equação (2), obtém-se:

$$\Delta P_T = \kappa_m V_f + \kappa_c V_f$$

## PERMEABILIDADE DO MEIO FILTRANTE

A permeabilidade do meio filtrante ( $k_f$ ) é uma das variáveis fundamentais na operação de filtração. Pode ser definida como sendo uma propriedade, do meio poroso, que determina a facilidade com que um fluido submetido a um gradiente de pressão atravessa os poros ou vazios do meio filtrante. A permeabilidade pode ser estimada através de duas relações empíricas, equações de Darcy e de Forchheimer, que relacionam a queda de pressão no meio filtrante com a velocidade superficial. A equação de Darcy quantifica a resistência ao escoamento de um fluido, para baixas velocidades, através de meios porosos granulares, homogêneos e incompressíveis (INNOCENTINI et al, 1999). A primeira relação empírica é dada por:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{\kappa_1} V_f$$

Sendo  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  espessura do meio filtrante,  $\kappa_1$  permeabilidade darciana,  $V_f$  a velocidade de filtração e  $\mu_g$  a viscosidade do gás e  $\rho_g$  a densidade do gás.

Outra equação utilizada para a determinação da permeabilidade do meio filtrante é conhecida como equação de Forchheimer aplicada a fluidos compressíveis (gás

ideal) em que a queda de pressão através do meio poroso descreve uma relação não linear com a velocidade superficial do fluido. Essa equação é composta pelos termos de forças viscosas e forças iniciais, respectivamente. A correlação a seguir é conhecida como equação de Forchheimer:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{\kappa_1} V_f + \frac{\rho_g V_f^2}{\kappa_2}$$

sendo  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  a espessura do meio filtrante,  $\kappa_2$  a permeabilidade não darciana,  $V_f$  a velocidade de filtração,  $\mu_g$  a viscosidade do gás e  $\rho_g$  a densidade do gás.

De acordo com Silva (2008), a predominância do termo viscoso ou inercial está relacionada ao número de Reynolds para um determinado escoamento de fluido. Para velocidades de filtração menores que 10 cm/s, na maioria das vezes, apenas o termo viscoso é significativo, podendo desprezar o termo inercial.

## VELOCIDADE SUPERFICIAL DE FILTRAÇÃO

A velocidade de filtração é um importante parâmetro na operação de filtração de gases por influenciar na vida útil do tecido, no tempo necessário para filtração, na profundidade que as partículas penetram nos interstícios dos tecidos e também, porque determina as dimensões do filtro, bem como a operação de limpeza (SEVILLE, et al 1997). Quanto menor for à área de filtração maior deve ser a velocidade de filtração para que o fluxo de gás possa atravessar o filtro de tecido.

Velocidades de filtração altas acarretam na maior penetração de particulados no meio filtrante, reduzem o tamanho da área de filtração, dificultam na operação

de limpeza, tornando mais difícil a remoção de tortas de filtração e, como consequências aumentam a queda de pressão na operação de filtração e diminui a vida útil do tecido menor. Em contrapartida, com a redução da área de filtração têm-se um custo inicial, operacional e de manutenção menores. Para baixos valores de velocidades de filtração, há maior consumo de energia devido maior tempo para penetração das partículas (DONOVAN, 1985).

Muitos trabalhos têm estudado a influência da velocidade de filtração durante toda a operação de filtração de gases e a maioria tem concluído que o aumento da velocidade de filtração acarreta no aumento da queda de pressão (DAVIS; KIM, 1999).

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Material Particulado

O particulado utilizado nos experimentos foi de rocha fosfática da empresa FOSFÉRTIL - Fertilizantes Fosfatados S.A., Patos Minas (MG), com densidade de  $2,89 \pm 0,01$  g/cm<sup>3</sup>. A distribuição granulométrica identificou um diâmetro médio volumétrico de 12,72 µm, obtida pela técnica de difração de raios laser, utilizando o equipamento Malvern Mastersizer Microplus MAF 5001° do laboratório de caracterização da UFU.

### Meios Filtrantes

Para os ensaios de filtração e limpeza foram selecionados três tipos de não tecidos (polipropileno, poliéster e acrílico) empregados na fabricação de filtros de mangas industriais.

Os tecidos sofreram tratamentos de chamuscagem e calandragem em um de seus lados com o intuito de facilitar o desprendimento das tortas de filtração durante o processo de limpeza. A Tabela 2 apresenta as principais características destes não tecidos.

Tabela 2 - Características e especificações dos meios filtrantes.

Produto	Polipropileno	Poliéster	Acrílico
Identificação	3006 PP	1016P	7002AC
Fibra	100% Polipropileno	100% Poliéster	100% Acrílico
Contextura	Agulhado	Agulhado	Agulhado
Espessura	2,1 mm	2,0 mm	2,2 mm
Peso	550 g/m <sup>2</sup>	550 g/m <sup>2</sup>	550 g/m <sup>2</sup>
Densidade	0,26 g/cm <sup>3</sup>	0,28 g/cm <sup>3</sup>	0,25 g/cm <sup>3</sup>
Volume de Poros	82%	82%	82%
Densidade específica	0,90	1,38	1,16

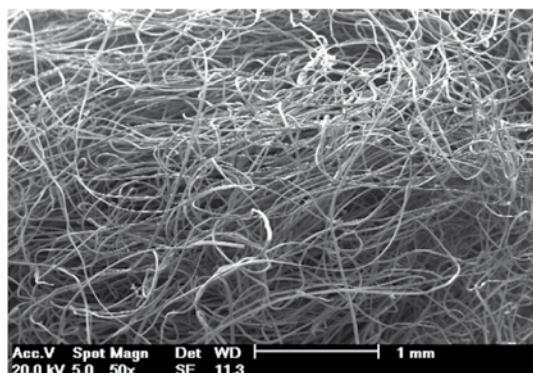
A caracterização dos meios filtrantes por MEV foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. As microfotografias dos não tecidos de polipropileno, poliéster e acrílico são apresentadas na Figura 2.

#### Unidade Experimental

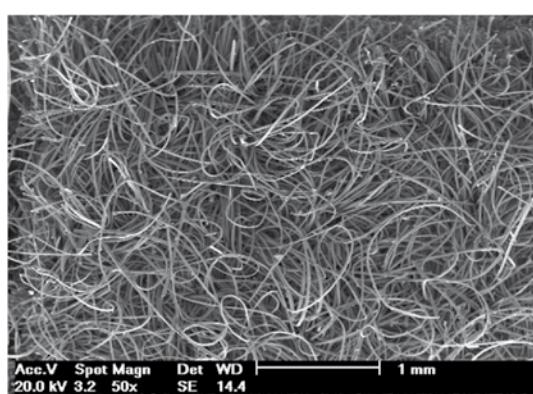
Os experimentos de filtração foram realizados na unidade experimental de filtração no Laboratório de Processos de Separação (LabSep) na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A Figura 3 apresenta o sistema experimental construído para realizar os ensaios, onde os materiais filtrantes foram cortados de acordo com a caixa de filtração que possui 20 cm de diâmetro e área de filtração de 314,16 cm<sup>2</sup>.

Os experimentos de filtração foram realizados com uma umidade relativa do ar de 8 a 12% com velocidades superficiais de filtração de 0,05; 0,075 e 0,10 m/s, para cada queda de pressão máxima estabelecida de 1000, 2000, 3000 e 4000 Pa para cada filtro de não tecido. Para a remoção das tortas de filtração aplicou-se o mecanismo de fluxo de ar reverso e velocidade de limpeza de 0,15 m/s, mantida constante durante 60 segundos.

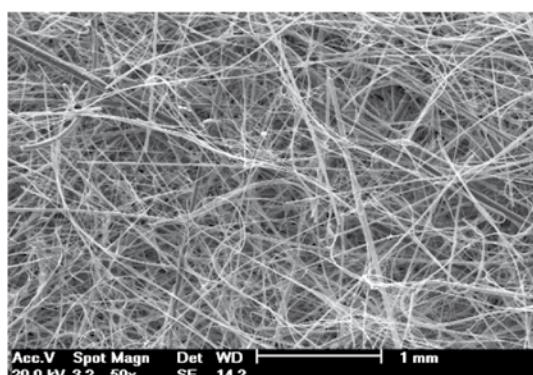
**Figura 2 - Microscopia dos não tecidos com aumento de 50 vezes: (a) Polipropileno, (b) Poliéster e (c) Acrílico.**



(a)

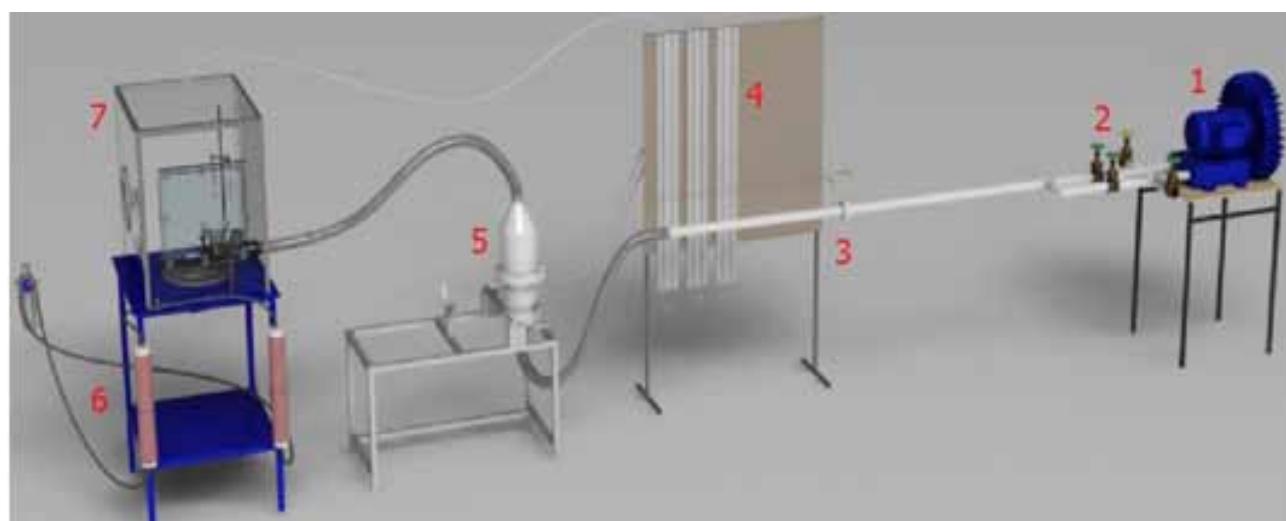


(b)



(c)

**Figura 3 - Diagrama esquemático da unidade experimental:** (1) soprador; (2) válvula gavetas; (3) placa de orifício; (4) manômetros; (5) caixa de filtração; (6) colunas desumidificadoras e (7) gerador de pó.



### Resistência Específica

Os ensaios para determinar a resistência específica dos meios filtrantes ao escoamento do gás foram realizados utilizando o sistema experimental conforme Figura 3. O cálculo da resistência específica foi pela inclinação da parte linear da curva da queda de pressão no filtro, em função da velocidade superficial de filtração, equação 5.

### Permeabilidade

A permeabilidade para cada meio filtrante ( $k_1$ ) foi determinada através da equação 9 de Darcy. A equação 10 de Forchheimer, não foi utilizada devido ao fato da curva experimental da queda de pressão em função à velocidade superficial de filtração ser representada por uma reta, indicando a preponderância das forças viscosas com relação às inerciais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Resistência Específica

As relações entre a queda de pressão no filtro em função da velocidade de filtração, realizada nos meios filtrantes limpos, são mostradas na Figura 4. O resultado da resistência específica de cada não tecido e o quadradado do coeficiente de correlação correspondente é apresentado na Tabela 3.

Figura 4 - Resistência específica dos meios filtrantes.

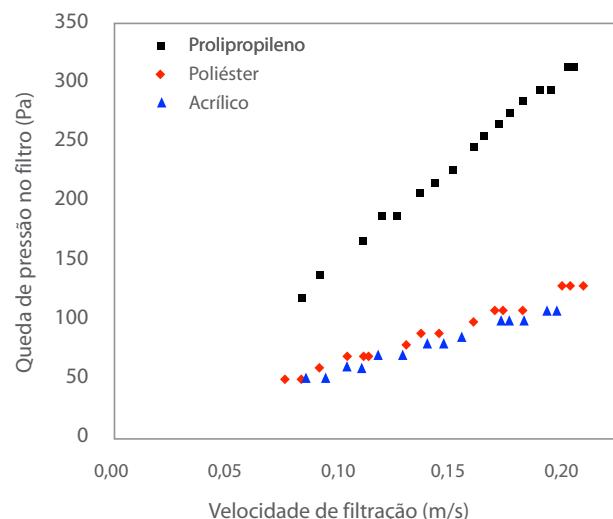


Tabela 3 - Valor obtido para a resistência específica dos meios filtrantes ( $k_1$ ) e para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

Portanto, por análise da Tabela 3 pode-se dizer que, o não tecido que apresentou maior resistência ao escoamento do fluido foi o polipropileno, seguido do poliéster e acrílico. Isso permite concluir que, a estrutura superficial do polipropileno é mais fechada que os demais, ou seja, há menor presença de espaços vazios (poros) devido a maior inclinação da curva de queda de pressão em função da velocidade superficial de filtração.

### Permeabilidade

Os valores encontrados para a permeabilidade darciana são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores obtidos para a permeabilidade darciana ( $k_1$ ).

Não tecido	Permeabilidade ao ar ( $k_1$ ) [m <sup>2</sup> ]
Polipropileno	Incolor
Poliéster	Azul claro
Acrílico	Violeta azulado

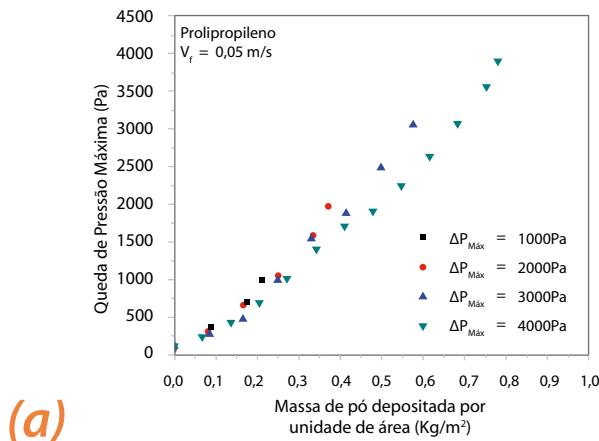
Com isso, o não tecido que apresentou a maior permeabilidade foi o acrílico, seguido do poliéster e polipropileno, e que estas estão praticamente constantes com o aumento da queda de pressão no meio filtrante. Isto mostra que não houve alteração significativa nas propriedades do fluido causadas pelo acréscimo da queda de pressão, como a viscosidade e a densidade do gás.

### Desempenho dos Meios filtrantes

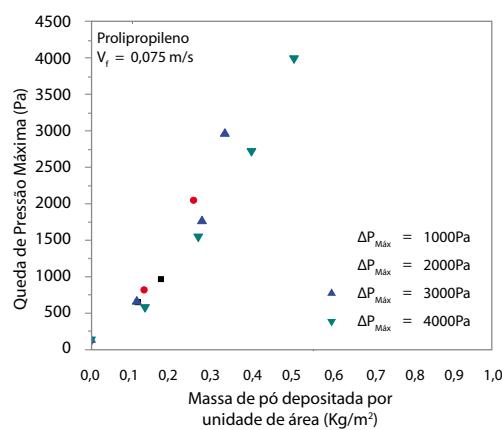
Para verificar as diferenças do desempenho dos meios filtrantes na operação de filtração e remoção das tortas de filtração, foram construídas curvas de quedas de pressão em função da massa de pó depositada por unidade de área para as velocidades de filtração de 0,05, 0,075 e 0,10 m/s. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam, respectivamente, os resultados para os casos de utilização dos meios filtrante à base de polipropileno, poliéster e acrílico.

Não tecido	Resistência específica do tecido ( $k_m$ ) [Kgm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]	Quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ )
Polipropileno	1.564,93	0,99
Poliéster	617,51	0,99
Acrílico	550,76	0,99

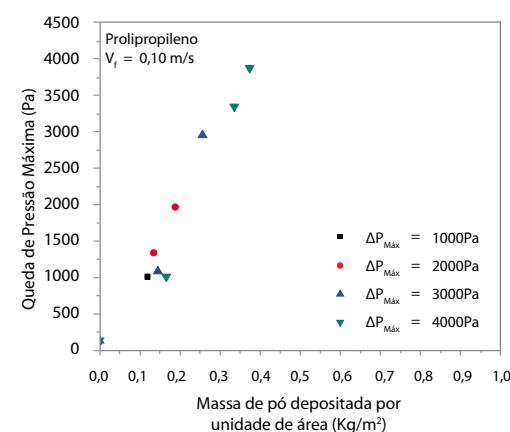
**Figura 5 - Queda de pressão em função da massa depositada por unidade de área para o polipropileno com velocidades de filtração de (a) 0,05, (b) 0,075 e (c) 0,10 m/s.**



(a)

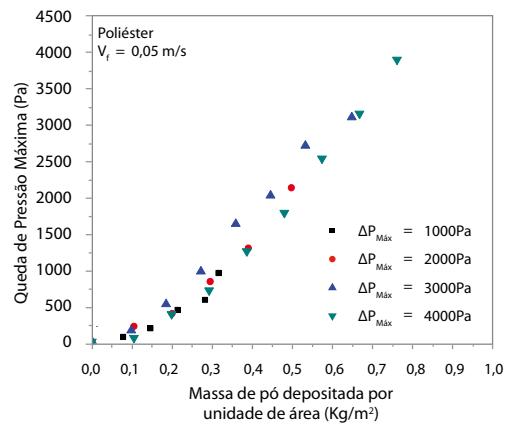


(b)

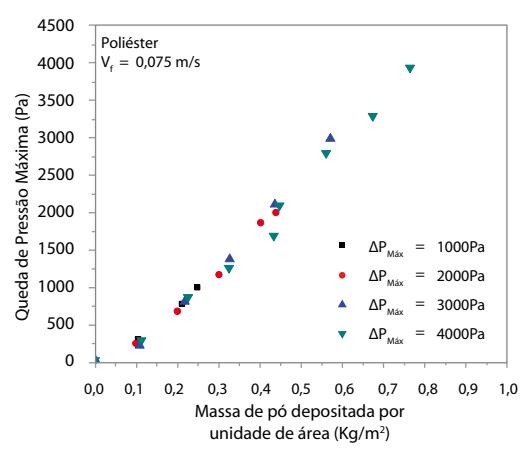


(c)

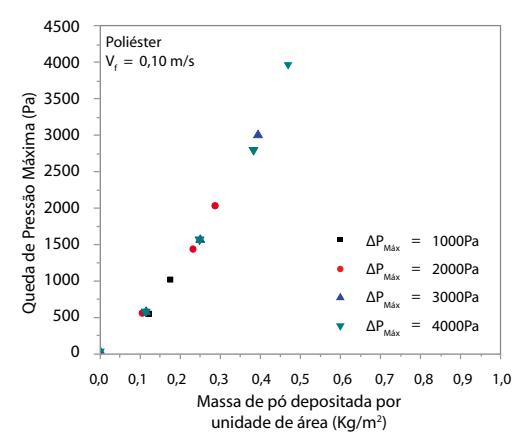
**Figura 6 - Queda de pressão em função da massa depositada por unidade de área para o poliéster com velocidades de filtração de (a) 0,05, (b) 0,075 e (c) 0,10 m/s.**



(a)

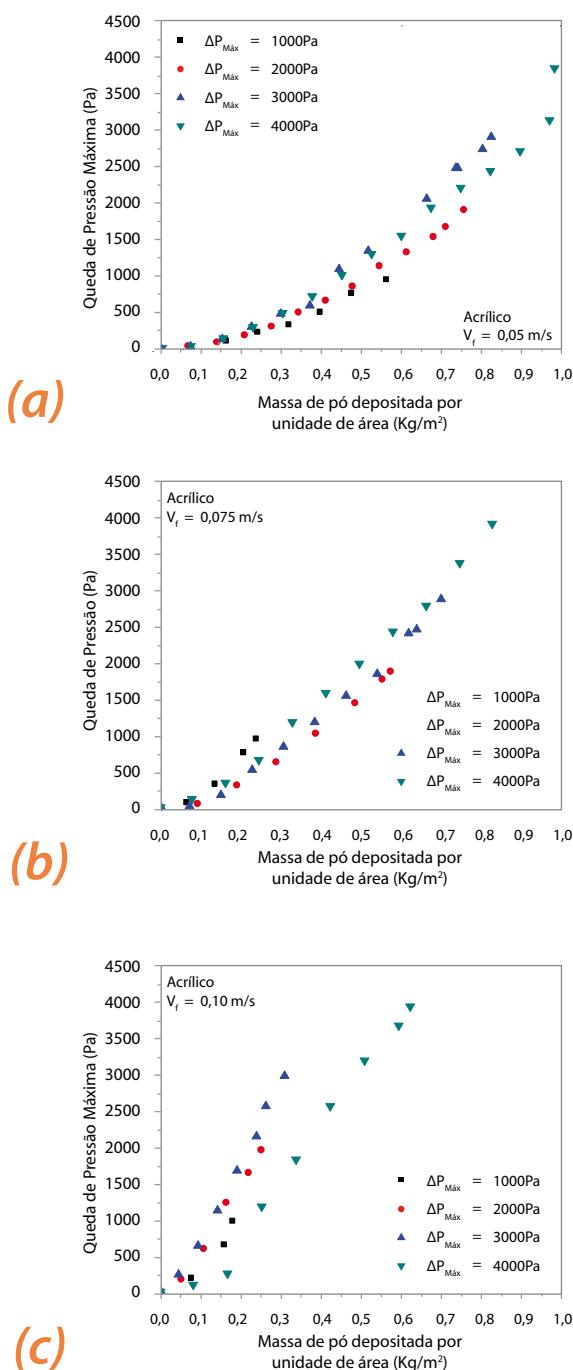


(b)



(c)

**Figura 7 - Queda de pressão em função da massa depositada por unidade de área para o acrílico com velocidade de filtração de (a) 0,05, (b) 0,075 e (c) 0,10 m/s.**



Por análise das Figuras 5, 6 e 7, foi verificado que o desempenho utilizando os diferentes não tecidos na filtração de gases foi distinto um do outro e que os ensaios experimentais, com a variação da espessura das tortas de filtração (quedas de pressão máximas estabelecidas no filtro) apresentaram boa reprodutibilidade, o que pode ser notado através da sobreposição das curvas de filtração. Pode-se constatar também que o meio filtrante que apresentou maior massa de pó depositada por unidade de área, consequentemente, maior tempo de filtração para uma mesma queda de pressão máxima foi o acrílico, seguido do poliéster e do polipropileno.

Percebe-se que as curvas de filtração para o meio filtrante acrílico e poliéster apresentaram um comportamento não linear ao iniciar a filtração de gases, comportamento diferente do observado para o polipropileno, em que o comportamento não linear praticamente não existiu.

A não linearidade apresentada no inicio da filtração com o meio filtrante acrílico indica a predominância da filtração interna, demonstrando que este meio filtrante coletou maior quantidade de material particulado no seu interior em relação aos demais. Assim, resultou em um período de formação da torta de filtração mais lento, em que essa etapa indica a fase em que as partículas depositam-se no interior das fibras do não tecido (etapa de transição inferior ou filtração de profundidade), formando à base da estrutura da torta a ser formada (dendritos) e, posteriormente, a formação de uma camada fina na superfície (ponto de colmatação), em que as partículas são coletadas e apresentando uma curva linear (filtração superficial ou ponto de transição superior). Tal fato foi ocasionado por razão deste meio filtrante apresentar uma maior permeabilidade, conforme mostrado na Tabela 4, e que filtros mais permeáveis possuem um incremento de queda de pressão menos elevado e, consequentemente, maior ponto de colmatação.

Em relação ao meio filtrante polipropileno, como já mencionado, o comportamento não linear praticamente não existiu, caracterizando em uma filtração superficial, na qual se observa uma maior inclinação das curvas de filtração para uma mesma queda de pressão máxima estabelecida. Ocorreu devido este meio filtrante apresentar uma menor permeabilidade em relação aos demais meios filtrantes, representando um período de operação de filtração com formação das tortas de filtração mais curto, havendo, consequentemente, menor quantidade de material coletado para as mesmas condições, menor penetração das partículas e, consequentemente, menor ponto de colmatação.

## CONCLUSÕES

A construção da unidade experimental mostrou-se adequada e eficiente aos estudos relacionados à filtração de gases em não tecidos possibilitando o surgimento de novos trabalhos em bancada laboratorial com as mesmas condições e características industriais.

Os resultados demonstraram que o acrílico foi o não tecido que apresentou uma estrutura superficial mais aberta com maior permeabilidade, seguido do poliéster e polipropileno. A diferença na estrutura dos meios filtrantes proporcionou ao meio mais permeável, acrílico, uma maior coleta de partículas de rocha fosfática para as quatro quedas de pressão máxima estabelecida e maior período de filtração interna para as três velocidades estudadas, diferentemente, do polipropileno em que prevaleceu a filtração superficial.

Levando-se em conta o controle da filtração por demanda de pressão o acrílico apresentou os melhores resultados, primeiro com um comportamento não linear no inicio da filtração, atingindo um comportamento linear posteriormente com filtração superficial.