



DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE EM TORTA DE PARTICULADOS FOSFÁTICOS NA FILTRAÇÃO EM MEIOS FILTRANTES

DEIVID MARQUES NUNES¹, LUCIANO PESKE CERON²

¹Doutorando em Engenharia Química - UFU - Faculdade de Engenharia Química

- deivid_ep@hotmail.com, ²Dr. Engenharia de Materiais - PUCRS - Faculdade de

Engenharia Química - luciano.ceron@pucrs.br

Revisão: Alessandra Brandani Biggi

O objetivo deste trabalho foi determinar a porosidade, através das correlações clássicas de Ergun e MacDonald, em tortas de filtração de particulados fosfáticos em função da queda de pressão, variando as velocidades superficiais de filtração em elementos filtrantes de não tecidos de acrílico, poliéster e polipropileno.

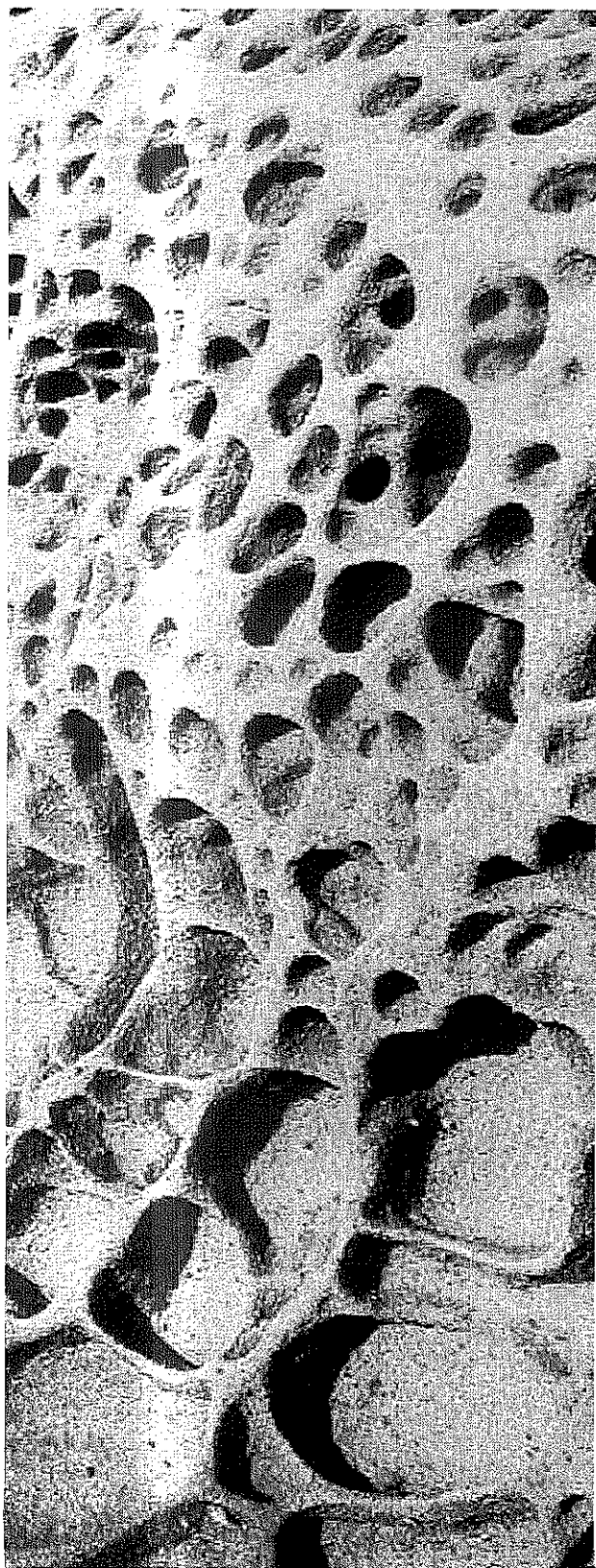
INTRODUÇÃO

O processo de formação das tortas de filtração em não tecidos filtrantes acontece em três distintos estágios nos ciclos de filtração, sendo: filtração de profundidade, etapa de transição e filtração superficial com distribuição uniforme da torta de filtração (KANAOKA, 2006).

No primeiro estágio da formação da torta de

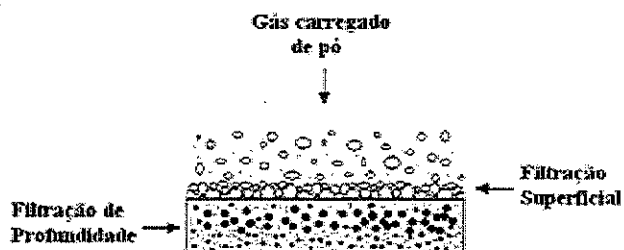
filtração, denominada filtração de profundidade, para um filtro nunca utilizado antes virgem as partículas de pó penetram intensamente no tecido e permanecem retidas nos interstícios das fibras. Esse estágio só ocorre na superfície limpa ou após a limpeza do filtro, até que a carga de pó estabelecida seja completamente retida ou acumulada na superfície do tecido.

A intensidade de penetração das partículas no tecido tende a diminuir em função do tempo de filtração e aumentar a eficiência de coleta das partículas e, consequentemente, a queda de pressão. Ao atingir o valor da queda de pressão máxima pré-estabelecida para a unidade experimental, tem-se a necessidade de fazer a limpeza do meio filtrante. A captura das partículas nesta etapa pode ocorrer através dos mecanismos inerciais interceptação



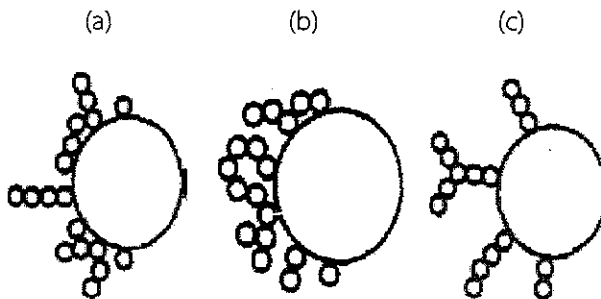
direta, movimento browniano e, em casos especiais, mecanismos eletrostáticos (WALSH, 1996). A figura 1 representa a etapa de filtração em profundidade e superficial.

Figura 1. Filtração de profundidade e filtração superficial.



Na etapa de transição, à medida que ocorre o processo de filtração, percebe-se que há a aglomeração de partículas no interior do tecido formando os chamados dendritos, que serão os novos meios de coleta das partículas (RODRIGUES, 2006). Segundo Bergman (1981), a aglomeração dessas partículas ou o entupimento do tecido por partículas (modelo combinado) ocorre em estágios, conforme visualizado na figura 2.

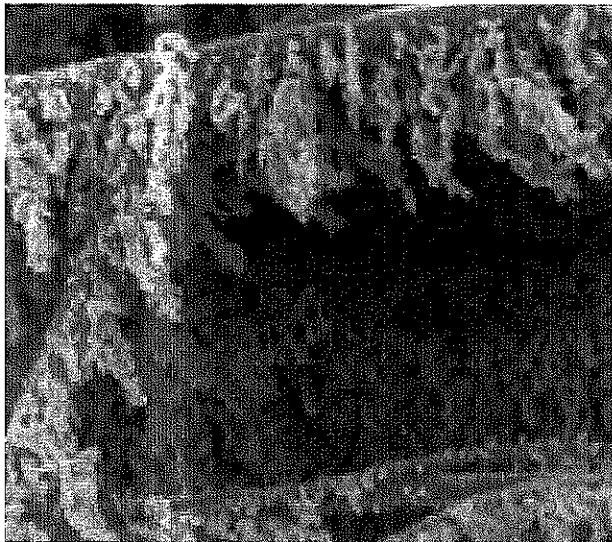
Figura 2. (a) Modelo dendrito, (b) modelo aumentando a fibra e (c) modelo combinado (BERGMAN et al., 1981).



O primeiro estágio é a deposição das partículas nas fibras do tecido limpo (pode ser caracterizado como o aumento das fibras); o segundo estágio ocorre quando uma quantidade de partículas se deposita na superfície do tecido e inicia-se a formação dos dendritos (modelo dendritos); o terceiro estágio é a fase em que há o crescimento desses dendritos e a interação com os dendritos vizinhos (que pode

ser mais uma vez semelhante ao aumento das fibras); a quarta e última etapa caracteriza-se quando os dendritos formados passam a constituir a torta de filtração. A figura 3 representa a superposição dos dendritos sobre as fibras.

Figura 3. Superposição dos dendritos no tecido, aumento 2000 vezes (Thomas, 2001).

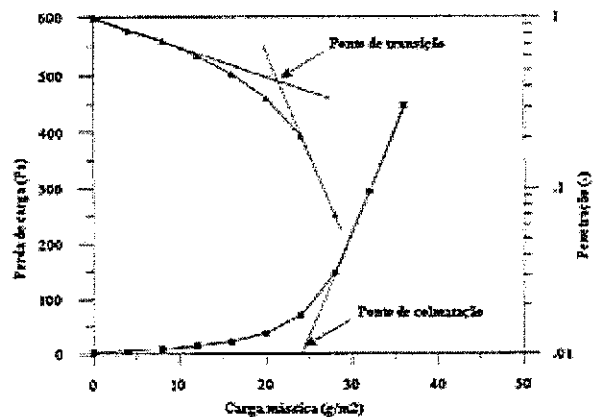


O início da formação da torta de filtração é demarcado através da adoção de um valor experimental que estabelece o ponto em que a torta se forma (ROCHA, 2010). Esse ponto é denominado de ponto de colmatação, representado pela figura 4, que consiste no lugar geométrico obtido para o cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas, em que é obtida a massa de pó necessária para a formação da torta (WALSH, 1996).

Para Japuntich (1996), o ponto de colmatação também é representado pela curva dada pelo gráfico de perda de carga em função da carga mássica, em que se percebe que no ponto de transição inferior há o afastamento da linearidade e no ponto de transição superior se nota a linearidade da curva, resultando na interseção das tangentes das duas parcelas lineares.

Com isso, a formação da torta é representada pelo ponto de transição superior da curva de carga de queda de pressão em que as mudanças da queda de pressão são lineares, conforme apresenta a figura 4.

Figura 4. Ponto de colmatação do meio poroso (WALSH, 1996).



POROSIDADE

Um dos métodos para determinar a porosidade da torta de filtração é o denominado Método Indireto em que a porosidade da torta e do meio filtrante são determinadas através de correlações clássicas, presentes na literatura, que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido (TOGNETTI, 2007). Uma das equações para determinar a perda de carga através da deposição da torta sobre um meio filtrante é dada pela equação de Ergun (1952):

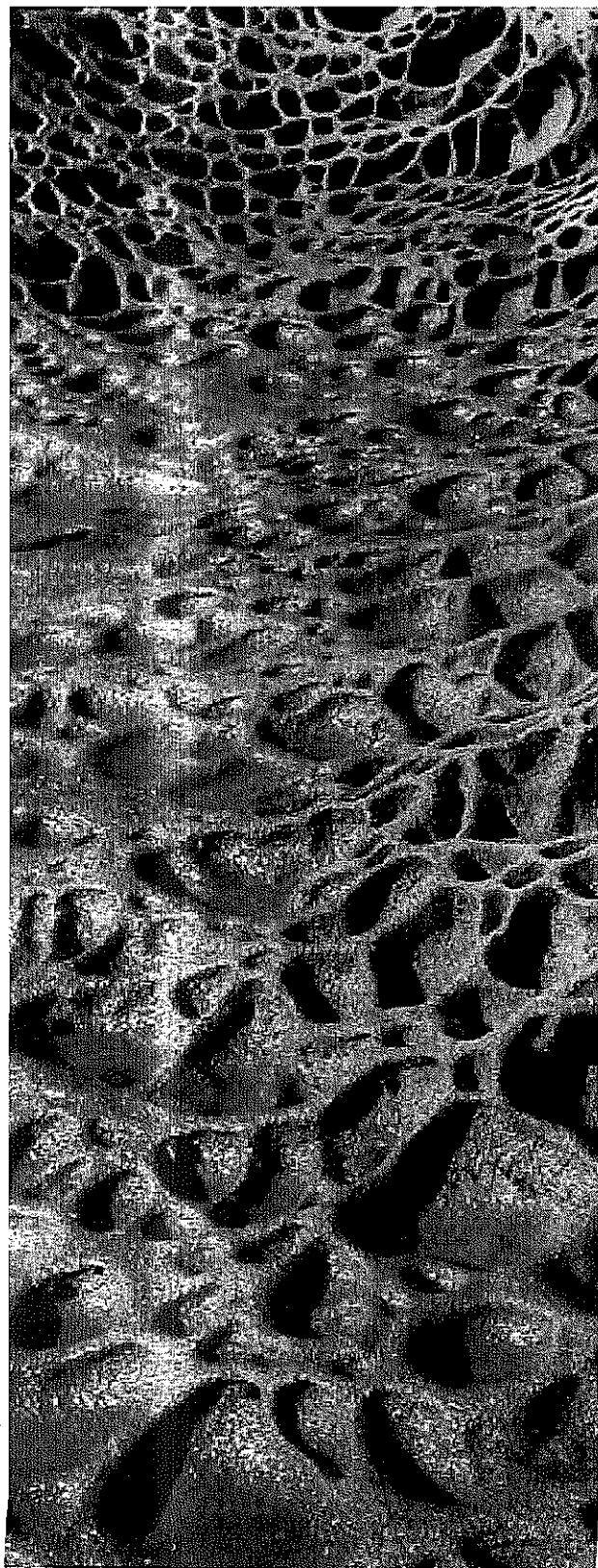
1.1

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu_g V_f}{\epsilon^3 d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\epsilon) \rho_g V_f^2}{\epsilon^3 d_p}$$

em que: μ_g é a viscosidade do gás, V_f é a velocidade superficial do fluido, d_p é o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes), L é a espessuras da torta, ρ_g é a densidade do gás e ϵ é a porosidade. A primeira parcela do segundo membro da equação se refere aos termos viscosos e a segunda ao componente inercial. Quando a filtração ocorre a baixos valores de Reynolds, o escoamento é puramente viscoso, desprezando-se a parcela inercial. Assim, a equação pode ser simplificada para:

1.2

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu_g V_f}{\epsilon^3 d_p^2}$$



Através da equação é possível determinar a porosidade da torta de filtração, uma vez que, com a sua formação, esta passa a exercer o papel de meio filtrante.

A espessura do sistema de filtração L pode ser considerada como sendo a espessura da torta de filtração, sendo possível ser obtida através da equação:

1.3

$$M = Qt = L \cdot A \cdot \rho_p (1 - \varepsilon)$$

em que: M é a massa da torta, Q é a vazão mássica de pó, A é a área superficial da torta, ρ_p é a densidade das partículas e t é o tempo de filtração. Isolando-se L na equação têm-se:

1.4

$$L = \frac{Qt}{A \rho_p (1 - \varepsilon)}$$

Substituindo a equação **1.2** pela a equação **1.4** obtém-se:

1.5

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1 - \varepsilon) \mu_g Q V_f}{\varepsilon^3 \rho_p d_p^2}$$

Outras correlações clássicas que podem ser utilizadas para determinar a porosidade pelo método indireto são, por exemplo, as equações de Kozeny-Carman, Rudnick-Happel, MacDonald, entre outras existentes na literatura.

A equação de Kozeny-Carman, de acordo com Tsai e Cheng (1998), é bastante aplicada para determinar a queda de pressão pela deposição de partículas sobre o tecido. Kozeny-Carman, considerando que o meio poroso pudesse ser representado por capilares, em que a superfície se iguala à superfície das partículas que compõe o meio, e fixando o volume do capilar aos volumes de vazios do meio, estabeleceram a seguinte correlação:

1.6

$$\Delta P = \frac{18 \mu_g V_f Q t}{A d_p^2 \rho_p C^r} + \frac{2 K_{CK} (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}$$

em que: ΔP é queda de pressão, η_g é a viscosidade do gás, V_f é a velocidade superficial do fluido, Q é a vazão mássica de pó, d_p é o diâmetro

médio das partículas, r_p a densidade das partículas, C' é o fator de correção de Cunningham, K_α é uma constante empírica que pode assumir valores de 4,8 para partículas esféricas e de 5,0 para partículas irregulares (LUCAS, 2000). A determinação do fator de correção de Cunningham é dada pela equação:

1.7

$$C' = \left[1 + \frac{2\lambda}{d_p \left[1,275 + 0,4e^{\left(\frac{-1,10d_p}{2\lambda} \right)} \right]} \right]$$

em que: λ é o livre percurso médio das moléculas do gás.

Na equação de Rudnick-Happel, adota-se, para o cálculo do fator de resistência, o modelo de célula de superfície livre em que a célula é a partícula associada ao volume de vazios no qual se assume algumas hipóteses: as partículas são esféricas; o volume da célula igual ao da partícula associada à porosidade do meio; e o cisalhamento na interface entre células é nulo (AGUIAR, 1991). Assumindo essas hipóteses e considerando que os termos inerciais da equação de Navier-Stokes são desprezíveis, obtêm-se uma correlação para a queda de pressão em função do tempo de filtração que permite determinar a porosidade da torta de filtração.

1.8

$$\Delta P = \left[\frac{3 + 2(1-\varepsilon)^{\frac{5}{3}}}{3 - 4,5(1-\varepsilon)^{\frac{1}{3}} + 4,5(1-\varepsilon)^{\frac{5}{3}} - 2(1-\varepsilon)^2} \right] \cdot \frac{18\mu V_f Q t}{A \rho_p d_p^2 C'}$$

Esta equação é considerada mais adequada para porosidades acima de 0,8 (SILVA NETO, 2002).

A equação de MacDonald é obtida por algumas modificações realizadas na equação de Ergun (1952). Nela considera-se a rugosidade das partículas, ampliando a faixa de abrangência da equação. Essa equação pode ser aplicada no modelo para partículas rugosas e para partículas não rugosas conforme as equações a seguir (ROCHA, 2010):

1.9

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180(1-\varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{4(1-\varepsilon) \rho_p V_f^2}{\varepsilon^3 d_p}$$

2.0

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180(1-\varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,8(1-\varepsilon) \rho_p V_f^2}{\varepsilon^3 d_p}$$

MATERIAIS E MÉTODOS

Material particulado

O particulado utilizado nos experimentos foi de rocha fosfática da empresa FOSFÉRTIL - Fertilizantes Fosfatados S.A., Patos de Minas (MG), com densidade de $2,89 \pm 0,01$ g/cm³. A distribuição granulométrica identificou um diâmetro médio volumétrico de 12,72 μ m; 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 não 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 1 apresenta as principais características destes não tecidos.

Tabela 1. 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 ²	550 g/m ²	550 g/m ²
Densidade	0,26 g/cm ³	0,28 g/cm ³	0,25 g/cm ³
Volume de Poros	82%	82%	82%
Densidade específica	0,90	1,38	1,16

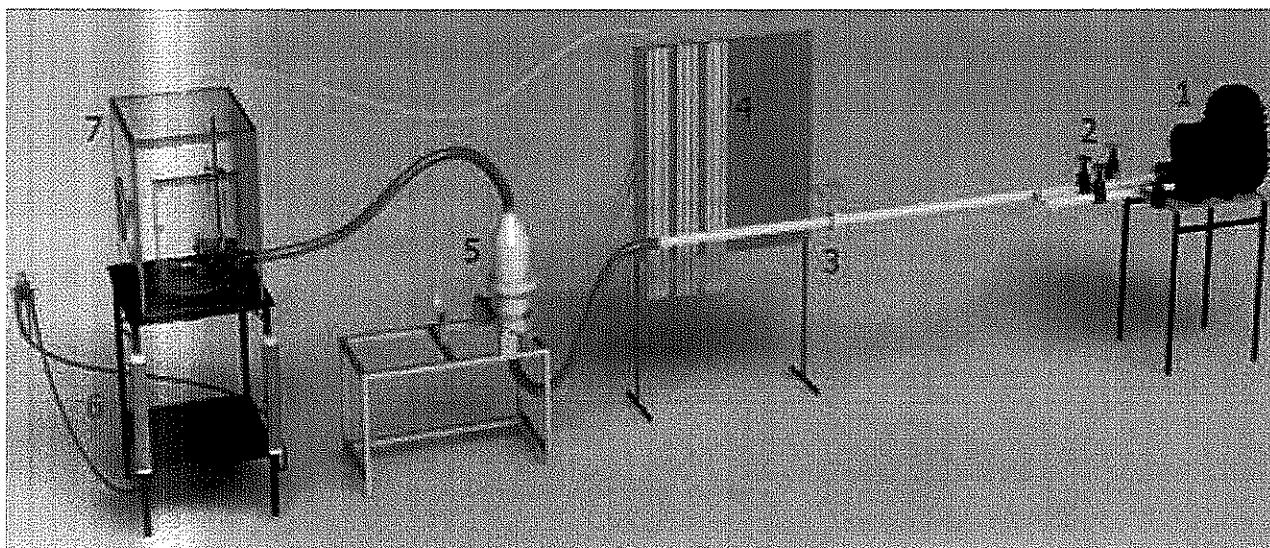


Unidade experimental

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). Foram realizados com uma umidade relativa do ar de 8 a 12% e com velocidades

superficiais de filtração de 0,05, 0,075 e 0,10 m/s, para cada queda de pressão máxima estabelecida de 1.000, 2.000, 3.000 e 4.000 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 5. 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.

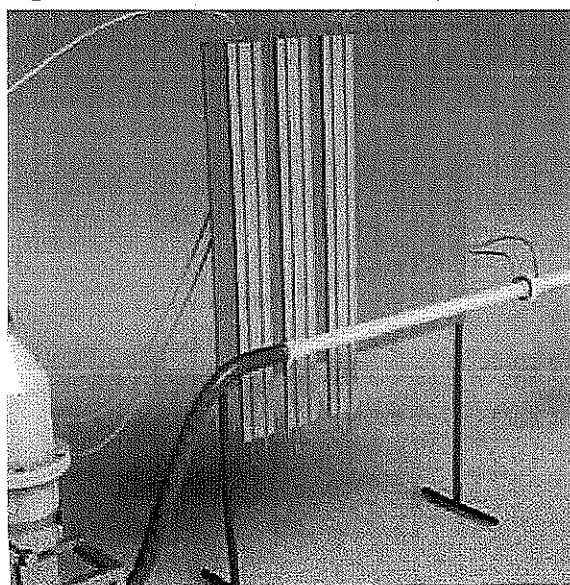


MEDICÃO DA VAZÃO E QUEDA DE PRESSÃO

Para a obtenção do valor da queda de pressão total no filtro na operação de filtração e limpeza, utilizou-se um manômetro diferencial do tipo U e, como fluido manométrico, a água. As tomadas de pressão eram localizadas na entrada e saída do filtro posicionado na caixa de filtração.

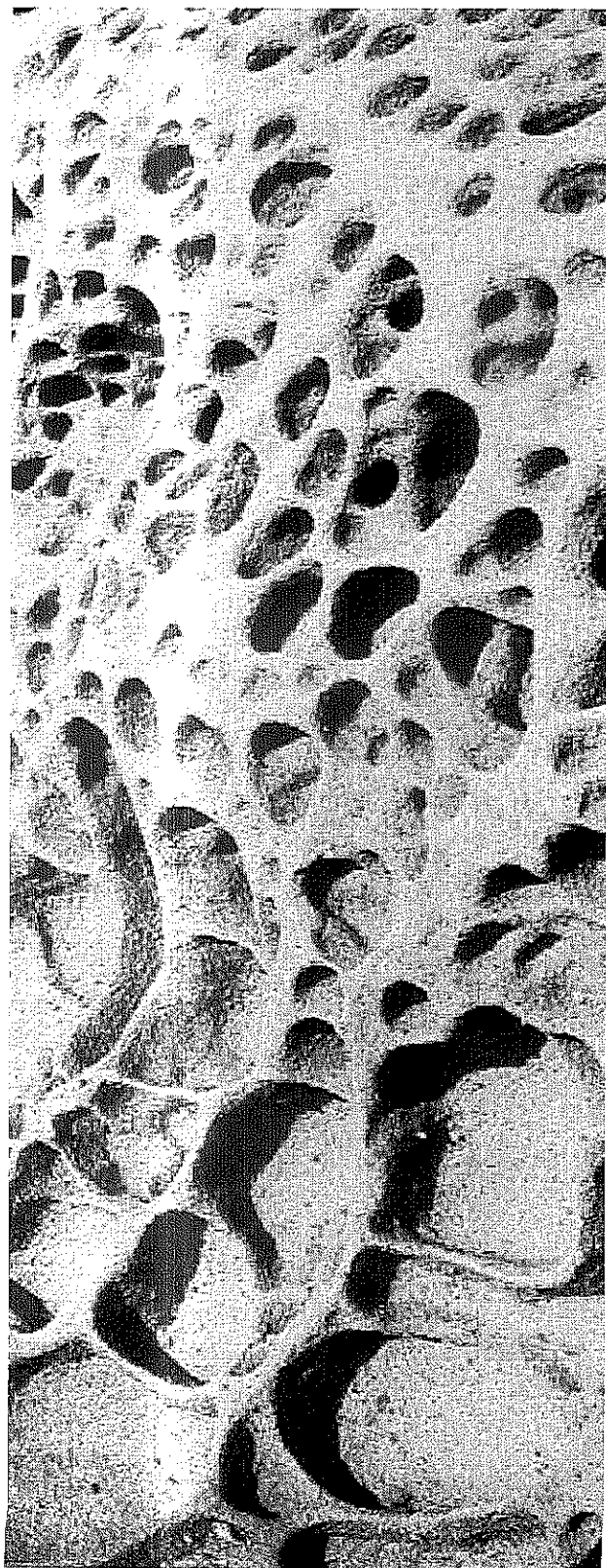
A determinação da vazão do gás nesses processos foi realizada através de uma placa de orifício conectada ao manômetro do tipo U, localizado entre a saída da caixa de filtração e do soprador. A figura 6 apresenta uma vista esquemática do sistema de manômetros utilizados neste trabalho.

Figura 6. Manômetro diferencial do tipo U.



Massa de pó depositada por unidade de área

A massa de pó depositada no filtro por unidade de área foi determinada por meio da equação (2.1) a cada



30 segundos durante o período de filtração para cada queda de pressão, pré-estabelecida no meio filtrante.

2.1

$$W_i = \frac{M_i t_i}{A t_i}$$

em que, W é massa de pó depositada por unidade de tempo e de área, M_i é a massa da torta de filtração recolhida no tempo t_i que é o tempo correspondente ao ponto calculado, A é a área de filtração e t_i é o tempo total de filtração.

Resistência específica dos meios filtrantes

Determinou-se a resistência específica dos meios filtrantes a partir de medidas experimentais em que o tecido era fixado à caixa de filtração, seguindo assim o mesmo procedimento da operação de filtração, porém, com a ausência de material particulado, no qual eram medidas as quedas de pressão no filtro em função da variação da velocidade de filtração.

Nos ensaios, considerou-se que a espessura dos meios filtrantes permaneceu constante durante a filtração e que o fluido era newtoniano e incompressível. Assim, a resistência específica do meio filtrante pôde ser determinada calculando a inclinação da parte linear da curva de pressão em função da velocidade de filtração, conforme a equação 2.2:

2.2

$$\Delta P_m = k_m V_f$$

em que: ΔP_m é a queda de pressão no meio filtrante, V_f a velocidade do gás e k_m a resistência específica do meio filtrante.

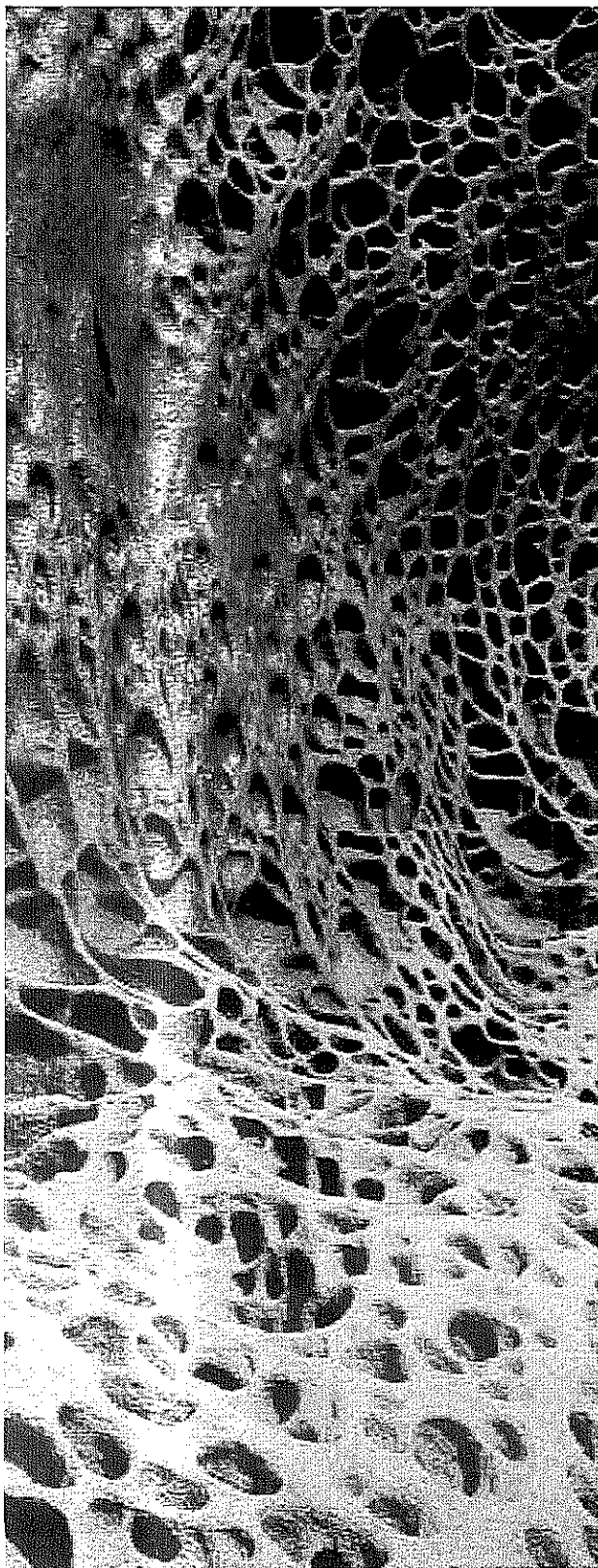
Viscosidade e permeabilidade

A viscosidade do gás foi calculada por meio da equação dada por Sutherland.

3.3

$$\mu_g(T) = 1,73 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \left(\frac{398}{T + 125} \right)$$

na qual: μ_g é a viscosidade do gás, dada em (Kg m⁻¹ s⁻¹) e T temperatura do gás, dada em Kelvin.



O procedimento utilizado para a obtenção da permeabilidade dos meios filtrantes consistia na passagem de um fluxo gasoso através do meio filtrante virgem fixado à caixa de filtração, em que eram realizados apontamentos de queda de pressão no meio filtrante em função da variação da velocidade de filtração.

A permeabilidade foi estimada através da equação proposta por Darcy em 1856, em que é aplicada para velocidades de filtração menores que 10 cm/s (SILVA, 2008). Assim, a equação 2.4 se resulta em:

2.4

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

sendo: ΔP_m a queda de pressão no meio filtrante, L_m a espessura do meio filtrante, k_1 permeabilidade do meio filtrante, V_f velocidade de filtração e μ_g viscosidade do gás.

Porosidade

As porosidades de tortas de filtração contendo, como material particulado, o pó de rocha fosfática, foram determinadas indiretamente das equações de Ergun (1952) e de MacDonald. Para efetuar as determinações, variou-se a velocidade superficial de filtração (0,05; 0,075 e 0,10 m/s), tempo de filtração e queda de pressão máxima (1000 a 4000 Pa) em experimentos utilizando os meios filtrantes adotados nesses trabalhos (polipropileno, poliéster e acrílico).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As figuras 7, 8 e 9 mostram o comportamento da porosidade para as equações de Ergun (1952) e MacDonald em função das espessuras de tortas de filtração e velocidades de filtração para o polipropileno, poliéster e acrílico, sendo que, a equação de Ergun modificada apresentou valores semelhantes à equação de Ergun (1952), sendo desprezível o termo quadrático da equação de Ergun (1952) e da equação de MacDonald, pois foram utilizadas velocidades superficiais de filtração de 0,05; 0,075 e 0,10 m/s.

Figura 7. Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações, para o polipropileno, em experimentos variando as velocidades de filtração de 0,05 m/s (a), 0,075 m/s (b) e 0,10 m/s (c) e a queda de pressão máxima.

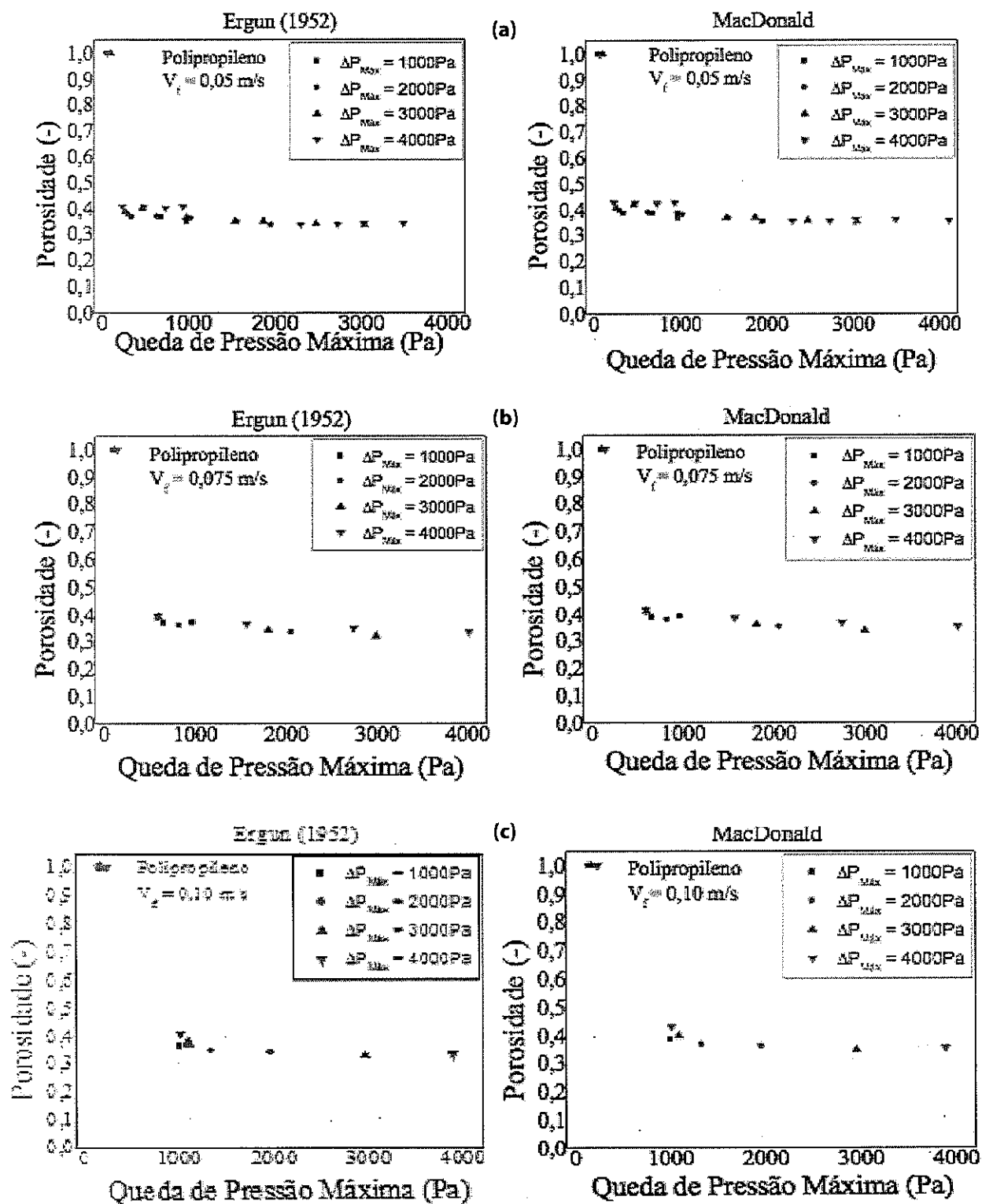


Figura 8. Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações para o poliéster, em experimentos variando as velocidades de filtração de 0,05 m/s (a), 0,075 m/s (b) e 0,10 m/s (c) e a queda de pressão máxima.

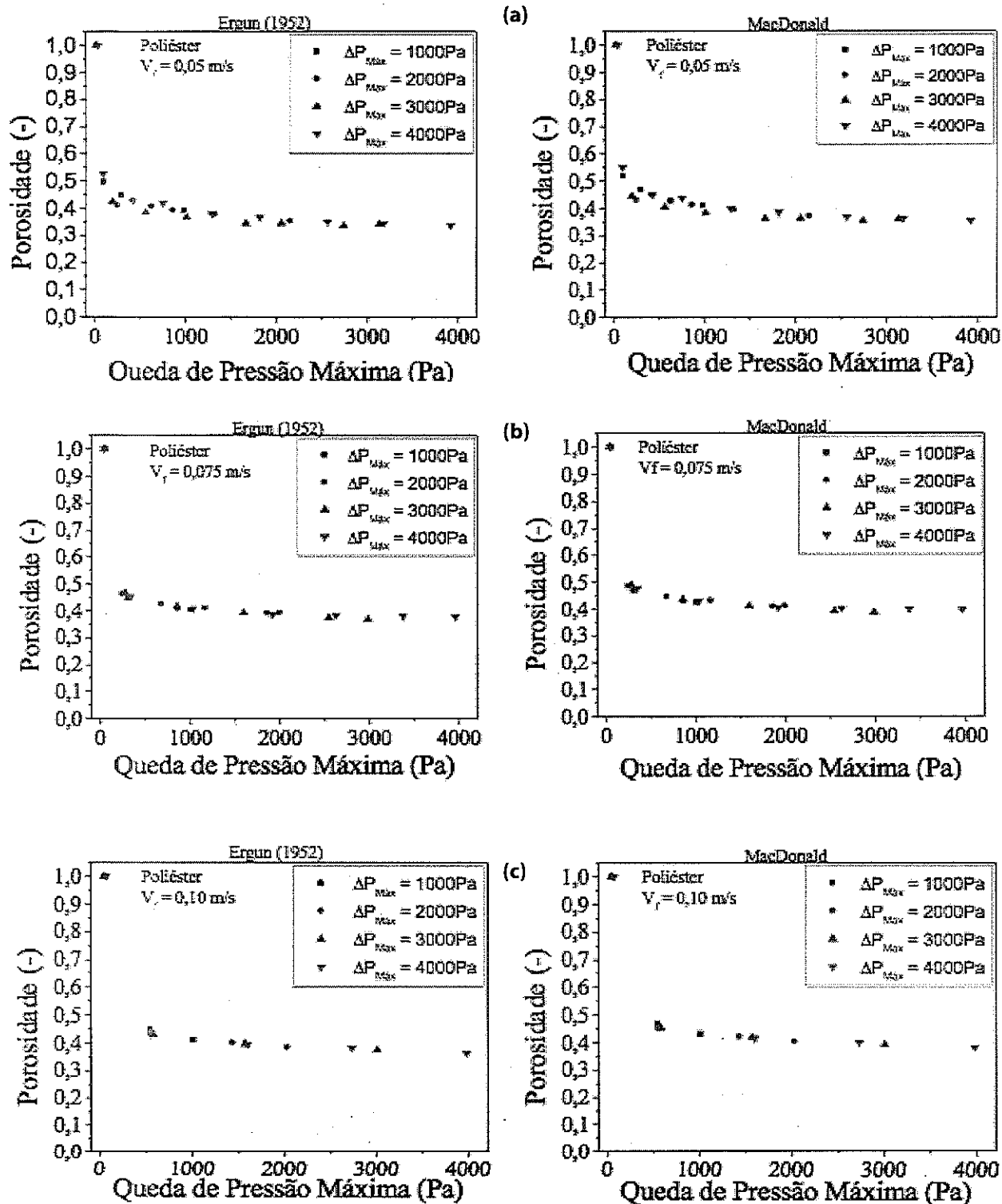
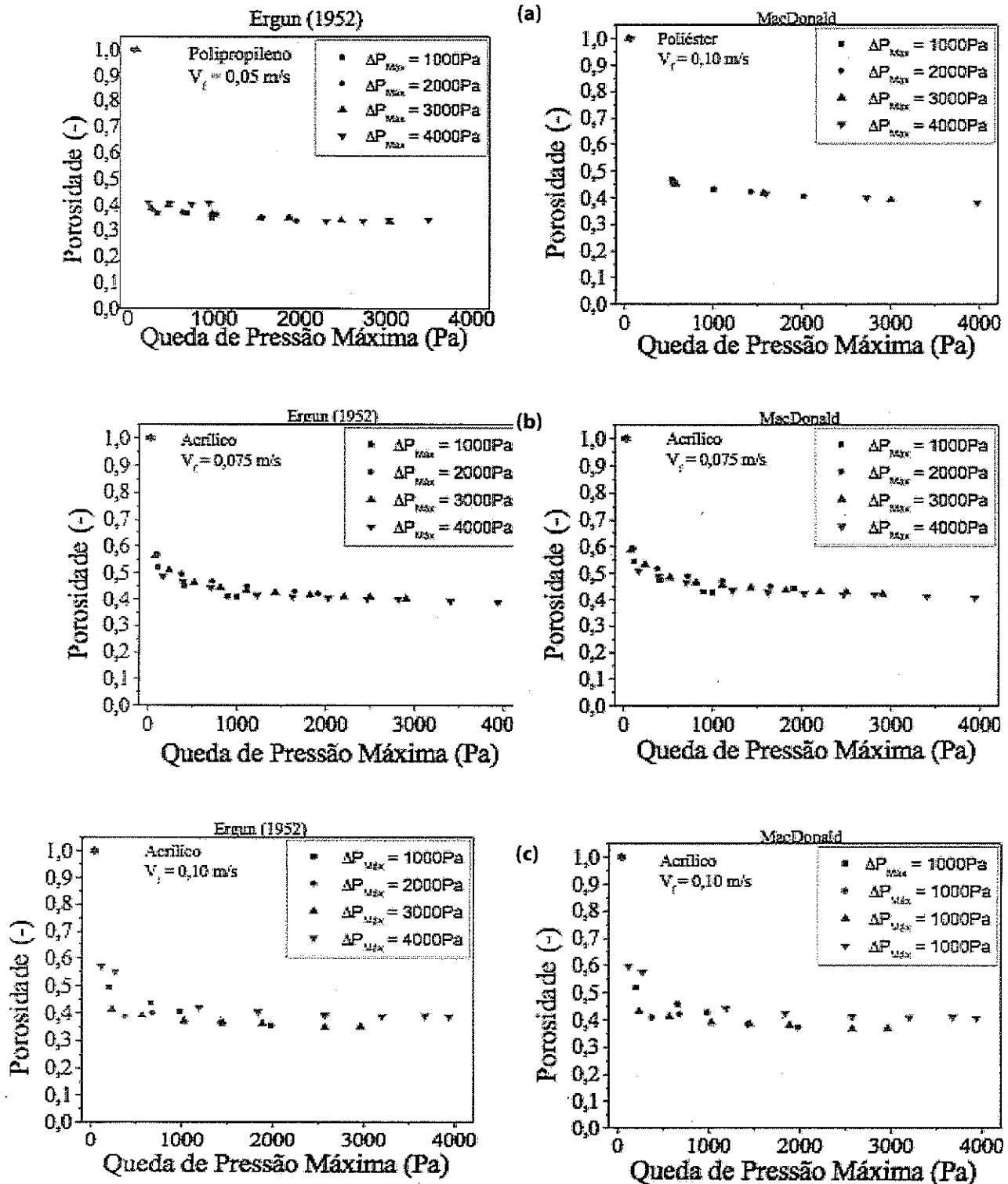


Figura 9. Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações para o acrílico, em experimentos variando as velocidades superficiais de filtração de 0,05 m/s (a), 0,075 m/s (b) e 0,10 m/s (c) e a queda de pressão máxima.





Percebe-se que a porosidade diminuiu até atingir cada queda de pressão máxima estabelecida, a uma velocidade de filtração constante e variando com o tempo de filtração, como era de se esperar de acordo com as equações. A porosidade de tortas de filtração diminuiu para os três tecidos e velocidades de filtração até atingir a queda de pressão máxima de 3.000 Pa e, depois, retornou a crescer até a queda de pressão máxima de 4.000 Pa. Esse comportamento também foi observado por Negrini (2001) que constatou que a porosidade média diminuía, estimada pela Equação de Ergun, e depois aumentava para as velocidades superficiais de filtração.

As porosidades das tortas de filtração constituídas por pó de rocha fosfática sobre polipropileno variaram entre 0,33 a 0,37 quando calculadas a partir das equações de Ergun (1952) e entre 0,35 a 0,39 quando calculadas pela equação de MacDonald. Para as tortas formadas sobre poliéster, o uso das equações de Ergun (1952) produziram porosidades variando entre 0,34 a 0,41 e o uso das equações de MacDonald levou a porosidades entre 0,35 a 0,43. Para as tortas formadas sobre acrílico, as equações de Ergun (1952) variaram de 0,36 a 0,46 e entre 0,36 a 0,48 quando calculadas usando as equações de MacDonald.

A porosidade das tortas de filtração para o polipropileno apresentou um aumento para a velocidade de 0,10 m/s e para acrílico e poliéster apresentaram um aumento nas velocidades de 0,05 m/s para 0,075 m/s e tendendo a diminuir para a velocidade de 0,10 m/s.

À medida que aumenta a massa de pó depositada por unidade de área, as camadas mais próximas ao não tecido são comprimidas pela força de arraste provocada

pela queda de pressão através das camadas superiores, e que a porosidade e espessura das camadas previamente formadas são reduzidas com o aumento da carga mássica. Entretanto, a taxa de aumento da camada de pó torna-se constante após uma determinada carga mássica, pois, a torta de filtração, em certa espessura, torna-se incompressível e o efeito da compressibilidade ocorre quando há o desvio da curva.

CONCLUSÕES

O comportamento das equações de MacDonald apresentou valores ligeiramente superiores aos valores das de Ergun, uma vez que essa equação foi gerada da própria equação de Ergun (tendo como diferença apenas o valor da constante que, para Ergun vale 150 e 1,75 e para MacDonald vale 180 e 4,0), que considera a rugosidade das partículas e permite maior faixa de abrangência da equação.

A porosidade das tortas de filtração diminuiu com o aumento da massa de pó depositada por unidade de área ou aumento da queda de pressão estabelecida e depois aumentou, demonstrando que a quantidade de massa depositada por unidade de área influencia na porosidade.

Para os diferentes meios filtrantes, nas mesmas condicionais operacionais, a porosidade de tortas de filtração diminuiu com o aumento da espessura de tortas de filtração. O decréscimo da porosidade em função da espessura de torta pode ser explicado devido ao fato do aumento da queda de pressão proporcionar maior compactação das tortas de filtração, diminuindo a distância entre as partículas e obstruindo a passagem do fluxo gasoso.

