

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

AMÉLIA GIOVANA FARGNOLI

**ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE DE TORTAS DE FILTRAÇÃO
DE GASES EM FILTROS DE TECIDO**

SÃO CARLOS

2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

AMÉLIA GIOVANA FARGNOLI

**ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE DE TORTAS DE FILTRAÇÃO
DE GASES EM FILTROS DE TECIDO**

**Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química para
obtenção do título de mestre em
Engenharia Química, área de
concentração em Pesquisa e
Desenvolvimento de Processos
Químicos.
Orientação: Prof. Dra. Mônica
Lopes Aguiar**

SÃO CARLOS

2010

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

F223ec

Fargnoli, Amélia Giovana.

Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido / Amélia Giovana Fargnoli. -- São Carlos : UFSCar, 2011.
126 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2010.

1. Filtração de gases. 2. Porosidade. 3. Filtros de manga.
I. Título.

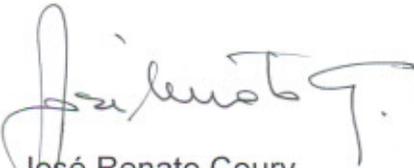
CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
AMÉLIA GIOVANA FARGNOLI APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 31 DE MARÇO DE 2010.

BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Luiz Gustavo Martins Vieira
UFU


José Renato Coury
UFSCar

Dedico este trabalho à minha família, à
minha mãe, irmãos e ao Sérgio.

AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que nos apóiam, incentivam e se sacrificam para que nós possamos conquistar nossos objetivos. Portanto, sou grata a toda minha família, professores e amigos que fazem e/ou fizeram parte da minha jornada. Agradeço em especial aos seguintes:

A Deus por sempre me dar força para seguir em frente, mesmo nos momentos mais conturbados.

A minha família: minha mãe, Vera e irmãos, Vecinho, Lú e Binho. Plagiando o Sérgio e a Bíblia: *“O pai que tem um filho correto e sábio ficará muito feliz e se orgulhará dele. Faça que seu pai se alegre por causa de você; dê à sua mãe esse prazer.”* Provérbios 23.24-25. Mãe, espero estar conseguindo.

Ao Sérgio por ser meu maior incentivador e “cobrador”, por todo amor, carinho e compreensão.

Aos amigos pré São Carlos e aos feitos aqui, especialmente a Bruna, por ter nos trazido para cá; ao Japa pelas infinitas “ajudas”; à Little, Balú e Anamaria pela ajuda no laboratório e fora dele; a Patrícia pelos galhos quebrados e aos amigos são-carlenses (em especial Guilherme, Cláudia, Karina e Horácio) por escutarem minhas lamentações sem saber do que se tratava o meu mestrado e tornarem as coisas mais fáceis com muitas risadas.

À Lane e família por ter nos acolhido ao chegarmos a São Carlos.

À professora Dra. Mônica Lopes Aguiar pela orientação e ensinamentos.

A todos os técnicos e funcionários dos departamentos de Engenharia Química e de Materiais pelas análises, consertos e empréstimos de materiais.

Ao CNPq pelo apoio financeiro no segundo ano de mestrado.

RESUMO

Nesse trabalho apresenta-se um estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases através da investigação de sua porosidade. A unidade experimental consistiu de um filtro circular com área livre de filtração de 249 cm^2 , com vazão mássica e umidade relativa do ar controladas e um sistema de aquisição de dados. Os meios filtrantes utilizados foram um feltro de poliéster (gramatura 600 g/cm^2) e um de acrílico (gramatura 550 g/cm^2). Os materiais pulverulentos usados foram um concentrado fosfático ($\rho_p = 3,20 \text{ g/cm}^3$ e $d_{St} = 5,6 \mu\text{m}$) e um silicato de magnésio (talco) ($\rho_p = 3,09 \text{ g/cm}^3$ e $d_{St} = 2,5 \mu\text{m}$). Para os ensaios de filtração com a rocha fosfática foi fixada a velocidade superficial de filtração em 10 cm/s e cinco quedas de pressão máximas ($100, 300, 600, 900$ e $1200 \text{ mmH}_2\text{O}$) à vazão mássica constante. Para os ensaios de filtração com o talco foi fixada a velocidade em 10 cm/s e quatro quedas de pressão máximas ($300, 600, 900$ e $1200 \text{ mmH}_2\text{O}$) à vazão mássica constante. Também foram realizados ensaios para o talco a diferentes velocidades ($7,5 \text{ cm/s}$, 10 cm/s , $12,5 \text{ cm/s}$ e $15,0 \text{ cm/s}$). Inicialmente, obtiveram-se dados experimentais de porosidade em função da queda de pressão por tempo de filtração. Cada torta obtida passou por um tratamento para adquirir resistência necessária e ser analisada em um Microscópio Eletrônico de Varredura. As imagens obtidas foram tratadas e analisadas em um programa de análise de imagem fornecendo o valor da porosidade da torta. Posteriormente, analisou-se a influência da velocidade superficial de filtração na porosidade média de tortas de filtração formadas pelo talco. Compararam-se os valores de porosidade obtidos pelas imagens geradas no MEV com os obtidos por equações da literatura. Encontrou-se uma diferença de 20 a 48% entre os valores de porosidade média experimental e estimada para as tortas de rocha fosfática e de menos de 13% para o talco a velocidade constante. Os valores de porosidade média encontrados para o talco foram maiores que os encontrados para a rocha, provavelmente devido ao fato de que o formato das partículas de talco se distancia muito do formato esférico. Foi possível detectar um comportamento de compressibilidade para as tortas dos dois materiais. A porosidade das tortas de talco tendeu a diminuir com o aumento da velocidade superficial de filtração.

Palavras-chave: Filtração de gases. Filtros manga. Tortas de filtração de gases. Porosidade. Compressibilidade. Velocidade superficial de filtração.

ABSTRACT

A study on the compressibility of gas filtration cakes through their porosity investigation is presented in this work. The experimental unit consisted of a circular filter with a filtration area of 249 cm^2 and a data acquisition system; mass flow rate and relative air humidity were controlled. The filter media used were a polyester felt (weighing 600 g/cm^2) and an acrylic felt (weighing 550 g/cm^2). A phosphate concentrate phosphate ($\rho_p = 3.20 \text{ g/cm}^3$ and $d_{St} = 5.6 \text{ }\mu\text{m}$) and a magnesium silicate (talc) ($\rho_p = 3.09 \text{ g/cm}^3$ and $d_{St} = 2.5 \text{ }\mu\text{m}$) were used as powder materials. Superficial filtration velocity was kept constant at 10 cm/s during phosphate concentrate filtration trials and five maximum pressure drops were set ($100, 300, 600, 900$ and $1200 \text{ mmH}_2\text{O}$) at constant mass flow rate. Superficial filtration velocity was kept constant at 10 cm/s during talc filtration trials and four maximum pressure drops were set ($300, 600, 900$ and $1200 \text{ mmH}_2\text{O}$) at constant mass flow rate. Trials at different filtration velocities (7.5 cm/s , 10 cm/s , 12.5 cm/s and 15.0 cm/s) were also performed. Initially, porosity data as a function of pressure drop per time were obtained. Each cake underwent a process to acquire the necessary resistance to be cut and embedded and then analyzed by a Scanning Electron Microscope. The obtained images were treated and analyzed in an image analyzing software which provided cakes' porosity values. Afterwards, the influence of gas superficial velocity on average porosity was evaluated for cakes formed by talc powder. The porosity values obtained with the SEM images were compared to those obtained with equations found in the literature. A difference of 20 to 48% between experimental average porosity and estimated porosity was found for the phosphate concentrate cakes and of less than 13% for the talc cakes obtained at constant velocity. The average porosity values found for talc cakes were higher than those found for phosphate concentrate cakes, which was probably due to the fact that talc particles shape is extremely different from the spherical shape. A compressibility behavior for cakes of the two materials was possible to be observed. Talc cake porosity decreased with the increase of superficial filtration velocity.

Keywords: Gas filtration. Fabric filters. Gas filtration cakes. Porosity. Compressibility. Superficial filtration velocity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema do processo de filtração de gases.....	4
Figura 2.2	Tipos de tecidos trançados.....	7
Figura 2.3	Esquema para explicar a redução da espessura da torta pelo efeito da compressão.....	17
Figura 2.4	Rocha fosfática: (a) Mina de extração, (b) usina de beneficiamento e (c) o produto já beneficiado.....	29
Figura 2.5	Talco: (a) extração; (b) forma antes do processamento e (c) talco processado (pó).....	31
Figura 3.1	Distribuição granulométrica do concentrado fosfático e do talco obtida através dos dados do Sedigraph.....	38
Figura 3.2	Microfotografias dos tecidos obtidas através de um MEV com ampliação de 50 vezes: (a) acrílico e (b) poliéster.....	39
Figura 3.3	Esquema geral da unidade experimental de filtração.....	40
Figura 3.4	Esquema da caixa de filtração.....	41
Figura 3.5	Esquema do alimentador de pó.....	42
Figura 3.6	Esquema geral do equipamento de pré-endurecimento da torta de filtração.....	46
Figura 3.7	Torta de filtração de rocha fosfática em feltro de poliéster após o pré-endurecimento.....	47
Figura 3.8	Foto de duas tortas embutidas e polidas (esquerda) e de duas tortas após tratamento para visualização no MEV (direita).....	49
Figura 3.9	Microfotografias de diferentes posições de uma amostra de torta de rocha fosfática obtidas no MEV com 1000X de aumento: (a) interface torta-ar, (b) centro e (c) interface torta-tecido.....	50
Figura 3.10	Microfotografias de diferentes posições de uma amostra de torta de talco obtidas no MEV com 1000X de aumento: (a) interface torta-ar, (b) centro e (c) interface torta-tecido.....	51
Figura 3.11	Microfotografia de uma torta de filtração de talco, (a) obtida diretamente do MEV e (b) após a binarização.....	52

Figura 3.12	Microfotografia de uma torta de filtração de rocha fosfática, (a) obtida diretamente do MEV e (b) após a binarização.....	53
Figura 3.13	Imagem da Figura 3.11 (b) e da Figura 3.12 (b), após coloração pelo Image Pro Plus.....	54
Figura 4.1	Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para (a) cinco quedas de pressão máximas diferentes tendo como meio filtrante um feltro de poliéster.....	56
Figura 4.2	Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para quatro quedas de pressão máximas tendo como meio filtrante um feltro de acrílico.....	56
Figura 4.3	Repetição do ensaio de queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para cinco quedas de pressão máximas diferentes tendo como meio filtrante um feltro de poliéster.....	57
Figura 4.4	Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para cinco quedas de pressão máximas tendo como meio filtrante um feltro de acrílico.....	57
Figura 4.5	Esquema para explicar a redução da espessura da torta pelo efeito da compressão.....	59
Figura 4.6	Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração para quatro quedas de pressão máximas diferentes para o talco, com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) tendo como meio filtrante um feltro de poliéster.....	60
Figura 4.7	Queda de pressão em função da massa de pó depositada para as quatro velocidades superficiais de filtração testadas.....	61
Figura 4.8	Comparação entre os valores de porosidade de tortas de rocha fosfática para os dois tecidos utilizados e de acordo com as Tabelas 4.2 e 4.4 e obtidos através das equações: (a) 2.11 e (b) 2.14.....	64
Figura 4.9	Comparação entre os valores de queda de pressão em função da massa de pó depositada sobre o meio filtrante de poliéster para uma queda de pressão máxima de 6000 N/m^2 para os dois pós.....	67

Figura 4.10	Comparação entre os valores de porosidade de uma torta de talco e outra de rocha calculados com auxílio da Equação 2.11 em função da massa de pó depositada tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para uma queda de pressão máxima de 6000 N/m^2	68
Figura 4.11	Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o poliéster para tortas de rocha obtidas em diferentes quedas de pressão máxima (ou diferentes espessuras).....	69
Figura 4.12	Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o acrílico para tortas de rocha obtidas em diferentes quedas de pressão máxima (ou diferentes espessuras).....	69
Figura 4.13	Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o poliéster para tortas de talco obtidas em diferentes quedas de pressão máxima (ou diferentes espessuras).....	71
Figura 4.14	Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o poliéster para tortas de talco obtidas a mesma queda de pressão e diferentes velocidades de filtração.....	72
Figura 4.15	Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11 e 2.14 e pelo método direto em função da quantidade de massa depositada por unidade de área do meio filtrante de poliéster para a rocha fosfática.....	74
Figura 4.16	Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11 e 2.14 e pelo método direto em função da quantidade de massa depositada por unidade de área do meio filtrante de acrílico para a rocha fosfática.....	74
Figura 4.17	Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11, 2.15 e 2.18 e pelo método direto em função da quantidade de massa depositada por unidade de área do meio filtrante de poliéster para o talco.....	75
Figura 4.18	Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11, 2.15 e 2.18 e pelo método direto em função da velocidade superficial de filtração tendo o poliéster como meio filtrante para o talco.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades primárias das partículas do material e secundárias do material.....	23
Tabela 2.2	Tipos de diâmetros e suas definições.....	24
Tabela 2.3	Reservas mundiais em 2008 e produção mundial de rocha fosfática em 2008 e 2009	28
Tabela 3.1	Valores de densidade, diâmetro médio de Stokes e circularidade para os materiais estudados.....	37
Tabela 3.2	Características dos meios filtrantes.....	39
Tabela 3.3	Exemplo dos dados obtidos na calibração do gerador de pó para o talco.....	43
Tabela 3.4	Vazão mássica média de pó (talco) para cada rotação do prato e os respectivos erros padrão médios das triplicatas.....	43
Tabela 4.1	Valores médios da porosidade das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para os dados da Figura 4.1.....	62
Tabela 4.2	Valores médios da porosidade das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para os dados da Figura 4.3.....	62
Tabela 4.3	Valores médios da porosidade das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de acrílico para os dados da Figura 4.2.....	63
Tabela 4.4	Valores médios da porosidade das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de acrílico para os dados da Figura 4.4.....	63

Tabela 4.5	Valores médios da porosidade das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para o talco a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster.....	65
Tabela 4.6	Valores médios da porosidade das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para o talco para uma queda de pressão máxima de aproximadamente 8826 N/m ² variando com a velocidade de filtração (cm/s) e tempo (s) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster.....	66
Tabela 4.7	Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de poliéster, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.....	70
Tabela 4.8	Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de acrílico, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.....	70
Tabela 4.9	Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para o talco tendo como meio filtrante o feltro de poliéster, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.....	72
Tabela 4.10	Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para o talco tendo como meio filtrante o feltro de poliéster e a velocidades diferentes, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.....	72
Tabela A1	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m ² , correspondente à Figura 4.1.....	89
Tabela A2	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m ² , correspondente à Figura 4.1.....	89
Tabela A3	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m ² , correspondente à Figura 4.1.....	90
Tabela A4	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² , correspondente à Figura 4.1.....	90

Tabela A5	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m ² , correspondente à Figura 4.1.....	91
Tabela A6	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m ² , correspondente à Figura 4.2.....	91
Tabela A7	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m ² , correspondente à Figura 4.2.....	92
Tabela A8	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m ² , correspondente à Figura 4.2.....	92
Tabela A9	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² , correspondente à Figura 4.2.....	93
Tabela A10	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m ² , correspondente à Figura 4.3.....	94
Tabela A11	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m ² , correspondente à Figura 4.3.....	94
Tabela A12	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m ² , correspondente à Figura 4.3.....	94
Tabela A13	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² , correspondente à Figura 4.3.....	95
Tabela A14	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m ² , correspondente à Figura 4.3.....	95
Tabela A15	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m ² , correspondente à Figura 4.4.....	96
Tabela A16	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m ² , correspondente à Figura 4.4.....	96

Tabela A17	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m ² , correspondente à Figura 4.4.....	96
Tabela A18	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² , correspondente à Figura 4.4.....	97
Tabela A19	Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m ² , correspondente à Figura 4.4.....	97
Tabela B1	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m ² , correspondente à Figura 4.6.....	98
Tabela B2	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m ² , correspondente à Figura 4.6.....	99
Tabela B3	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² , correspondente à Figura 4.6.....	100
Tabela B4	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m ² , correspondente à Figura 4.6.....	101
Tabela B5	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² e velocidade de filtração de 7,5 cm/s, correspondente à Figura 4.7.....	103
Tabela B6	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² e velocidade de filtração de 10,0 cm/s, correspondente à Figura 4.7.....	105
Tabela B7	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² e velocidade de filtração de 12,5 cm/s, correspondente à Figura 4.7.....	106
Tabela B8	Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m ² e velocidade de filtração de 15,0 cm/s, correspondente à Figura 4.7.....	106
Tabela C1	Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.1.....	107

Tabela C2	Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.1.....	108
Tabela C3	Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.3.....	109
Tabela C4	Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.3.....	109
Tabela C5	Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.2.....	110
Tabela C6	Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.2.....	111
Tabela C7	Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.4.....	112
Tabela C8	Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.4.....	112
Tabela C9	Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.....	113
Tabela C10	Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.....	115
Tabela C11	Porosidade estimada pela Equação de Endo para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.....	118
Tabela C12	Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m ² para o talco a velocidade 7,5 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.....	120
Tabela C13	Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m ² para o talco a velocidade 10,0 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.....	123

Tabela C14	Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m^2 para o talco a velocidade $12,5 \text{ cm/s}$ tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.....	125
Tabela C15	Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m^2 para o talco a velocidade $15,0 \text{ cm/s}$ tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.....	126

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Aspectos gerais da filtração de gases.....	4
2.1.1. Mecanismos de coleta.....	5
2.1.2. Meios filtrantes de tecido – tecidos utilizados em filtros manga.....	6
2.1.2.1. Tecidos trançados.....	7
2.1.2.2. Tecidos não trançados.....	8
2.1.3. Mecanismos de limpeza.....	8
2.1.4. Forças de adesão e coesão.....	9
2.2. Fundamentos da filtração.....	10
2.2.1. Formação da torta de filtração.....	10
2.2.2. Queda de pressão.....	11
2.2.2.1. Lei de Darcy.....	12
2.2.2.2. Queda de pressão através do meio filtrante.....	13
2.2.2.3. Queda de pressão através da torta de filtração.....	14
2.2.3. Velocidade superficial de filtração.....	15
2.2.4. Porosidade das tortas de filtração.....	16
2.2.4.1. Método indireto.....	17
2.2.4.2. Método direto.....	21
2.5. Propriedades da partícula.....	22
2.5.1. Tamanho das partículas.....	23
2.5.2. Formato das partículas.....	25
2.6. Material Particulado.....	27
2.6.1. Concentrado fosfático (Rocha fosfática).....	27
2.6.2. Silicato de magnésio (Talco).....	30
2.7. Estudos relacionados à porosidade/compressibilidade de tortas de filtração.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1. Materiais.....	37
3.1.1. Material pulverulento.....	37
3.1.2. Tecido.....	38
3.2. Unidade Experimental.....	39
3.2.1. Caixa de filtração.....	40
3.2.2. Sistema de alimentação do material particulado.....	41
3.2.2.1. Calibração do gerador de pó.....	42

3.2.2.2. Caixa de desumidificação e desumidificadores.....	44
3.2.2.3. Sistema de aquisição de dados e controle.....	44
3.3. Metodologia experimental.....	45
3.3.1. Ensaio de filtração.....	45
3.3.2. Determinação experimental da porosidade da torta de pó.....	45
3.3.2.1. Pré-endurecimento da torta.....	46
3.3.2.2. Embutimento.....	47
3.3.2.3. Seccionamento.....	48
3.3.2.4. Esmerilamento.....	48
3.3.2.5. Polimento.....	48
3.3.2.6. Obtenção das microfotografias.....	49
3.3.2.7. Análise das imagens.....	52
3.3.2.8. Obtenção da porosidade.....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1. Filtração.....	55
4.1.1. Rocha fosfática.....	55
4.1.1.1. Comportamento de compressibilidade da torta de filtração.....	58
4.1.2. Silicato de magnésio (talco químico).....	59
4.2. Determinação da porosidade das tortas de filtração.....	61
4.2.1. Método indireto.....	62
4.2.2. Método direto.....	68
4.2.2.1. Rocha Fosfática.....	68
4.2.2.2. Talco.....	71
4.2.3. Comparação da porosidade calculada pelos métodos indireto e direto.....	73
5. CONCLUSÕES.....	78
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS.....	81
APÊNDICE A.....	89
APÊNDICE B.....	98
APÊNDICE C.....	107

1. INTRODUÇÃO

Desde o advento dos processos de industrialização e urbanização, surgiram índices de poluição cada vez mais acentuados que começaram a afetar a qualidade de vida do ser humano e a ameaçar o meio ambiente. Por isso, restrições na política ambiental foram instituídas no mundo. No entanto, muitos agentes poluentes ainda são lançados na atmosfera e a preocupação com o meio ambiente e com a qualidade do ar é crescente. Esta preocupação levou ao estudo de processos que possibilitam reduzir a emissão de poluentes na atmosfera e, dessa forma, melhorar a qualidade de vida da população. Para diminuir os níveis de agentes nocivos dispersos na atmosfera e aumentar o reaproveitamento de material passaram a existir novos planejamentos industriais e equipamentos para limpeza de gases. Atualmente, com as normas e leis cada vez mais rigorosas, com a necessidade de se melhorar a qualidade do ar e com o intuito de recuperar material com valor agregado, é imprescindível que esses equipamentos sejam mais eficientes.

Um dos processos existentes que possibilita a separação gás-sólido é a operação de filtração. Esta operação, definida como sendo um processo de separação de partículas dispersas em um fluido através de meios porosos, é um meio simples, versátil e econômico de coletar e separar partículas em aerossóis. Ela pode ser utilizada em diversas aplicações, como: proteção respiratória, limpeza de ar de efluentes de caldeiras, indústria farmacêutica e alimentícia, limpeza de salas, limpeza de gases e recuperação de material particulado (HINDS, 1999).

Os filtros de tecido são um dos tipos de meios filtrantes mais empregados no processo de filtração (LYDON, 2008). Dentre estes filtros estão os filtros de manga, onde os meios filtrantes de fibras naturais e sintéticas são muito utilizados, pois são relativamente baratos, de fácil operação e de alta eficiência na remoção de material particulado numa faixa de distribuição granulométrica bastante ampla (DONOVAN, 1985). Contudo, hoje, os tecidos de fibra sintética são mais utilizados devido a menores custos, maior resistência química e mecânica e maior flexibilidade, o que facilita a sua limpeza. Algumas das fibras sintéticas mais utilizadas são aquelas formadas por acrílicos, poliamidas, poliésteres e polipropileno (TOGNETTI, 2007).

Na operação de filtração, à medida que a corrente gasosa contendo partículas suspensas passa através do meio filtrante, estas se depositam, primeiramente no interior do

filtro e, depois, na superfície do mesmo formando a torta de filtração. A formação desta torta imprime uma resistência ao fluxo de gás aumentando a queda de pressão (perda de carga) no filtro. Quando certo valor de queda de pressão é atingido, a torta deve ser removida. A resistência ao fluxo e o destacamento da torta são dependentes, dentre outras propriedades, da porosidade da torta (SALEEM; KRAMMER, 2007).

A queda de pressão total de um sistema é determinada pela medida da diferença de pressão total em dois pontos do filtro, usualmente medida na entrada e na saída (SEVILLE, 1997). Esta variável é fundamental para o projeto e operação de filtros, já que seu aumento determina a frequência de limpeza do filtro e sua variação influencia no processo de formação da torta de filtração. No entanto, a determinação precisa da queda de pressão é difícil, uma vez que ela é dependente de muitos fatores que surgem do projeto do filtro, das partículas a serem removidas e das propriedades do gás, bem como das condições operacionais. Além disso, a propriedade de compressão da torta acumulada na superfície do filtro torna a situação ainda mais complexa, pois leva à compactação da camada de pó resultando na redução da porosidade da torta e a um aumento da queda de pressão através da mesma (KIM et al., 2008). De acordo com Jeon e Jung (2004), apesar da crescente importância da tecnologia de filtração por tecido no campo do controle da poluição do ar, ela não é completamente compreendida por causa de dificuldades de analisar o comportamento da compressão de tortas de pó associado a propriedades de partículas. Segundo Cheng e Tsai (1998), as partículas de formatos irregulares com pequena faixa de distribuição granulométrica são conduzidas ao filtro intercalando uma sobre a outra ao acaso e de maneira irregular, aumentando a porosidade, enquanto as partículas esféricas, por terem o mesmo formato, preenchem mais os espaços intersticiais permitindo uma menor porosidade.

A limpeza do filtro deve ser realizada quando um determinado valor da queda de pressão é atingido para evitar altos gastos energéticos (XU et al., 2008). Assim, grandes quedas de pressão significam ciclos de limpeza mais frequentes o que provoca o rápido desgaste do filtro elevando ainda mais os custos com a filtração.

Tognetti (2007), que estudou a influência das variáveis operacionais na formação e remoção de tortas para tecidos de polipropileno, de poliéster e de acrílico, utilizando a rocha fosfática como material particulado, concluiu que o aumento do tamanho dos pedaços removidos foi observado com o aumento da massa coletada, comprovando que tortas mais espessas são mais facilmente removidas.

Paschoal (2007), continuando o trabalho de Tognetti (2007), mas investigando somente o tecido de polipropileno, verificou que, para o maior valor de queda de pressão

máxima obtiveram-se os menores valores da resistência específica da torta e os maiores valores da porosidade da torta. Isso demonstrou que, variando apenas a espessura da torta, ocorreram mudanças na estrutura da mesma.

Outro fator muito importante na queda de pressão são as partículas que ficam depositadas no tecido do meio filtrante após a remoção da torta. Estas partículas diminuem a porosidade do tecido, pois causam um “entupimento”, o que influencia na resistência à filtração. Por causa desse “entupimento” a queda de pressão máxima é atingida mais rapidamente a cada ciclo de filtração e, como consequência, o meio filtrante deve ser substituído mais frequentemente. Além disso, causa erros na previsão da espessura real da torta e também da sua porosidade. Portanto, essa região próxima à superfície do filtro deve ter sua porosidade detalhadamente investigada (AL-OTOOM, 2005; HOEFLINGER et al.; 2007; MAUSCHITZ et al., 2007).

Dessa forma, a porosidade está diretamente ligada às propriedades de limpeza do meio filtrante e de compressão da torta, uma vez que, quanto maior a compressão da torta, menor sua porosidade e, conseqüentemente, maior a queda de pressão no filtro e maior a dificuldade de remoção da torta.

Apesar da importância de se determinar a porosidade, ela é ainda pouco investigada, devido a grandes dificuldades de determiná-la experimentalmente. A determinação dos valores exatos da porosidade não é uma tarefa fácil, pois a obtenção das tortas de pó é um processo complexo, uma vez que elas são extremamente frágeis. Pesquisadores, então, vêm desenvolvendo métodos para obter ou estimar a porosidade das mesmas.

Dois métodos criados foram: o método indireto e o método direto. No primeiro, a porosidade de tortas de filtração de gases pode ser obtida a partir de equações encontradas na literatura que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido. No segundo, criado por Schmidt e Löffler (1991) e adaptado por Coury e Aguiar (1995) e posteriormente por Ito (2002), a porosidade é quantitativamente determinada com o uso de microscópio ótico (MO) ou microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Em vista do que foi apresentado, torna-se evidente a necessidade de estudar a estrutura das tortas de filtração e suas características. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo estudar a porosidade das tortas de filtração de gases para tortas de diferentes espessuras obtidas a quedas de pressão máximas distintas através dos métodos direto e indireto para verificação da compressibilidade das mesmas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos gerais da filtração de gases

A filtração de gases consiste basicamente na passagem de um gás contendo material particulado através de um meio filtrante poroso que coleta as partículas permitindo a passagem do fluido limpo. Este é um dos processos de limpeza de gases mais antigos e um dos mais utilizados até a atualidade devido à alta eficiência de coleta dos filtros com moderado consumo energético e fácil manuseio.

À medida que as partículas suspensas se depositam e aderem ao meio filtrante, há a formação da torta de filtração de gases. A Figura 2.1 mostra um esquema simples do processo de filtração de gases.

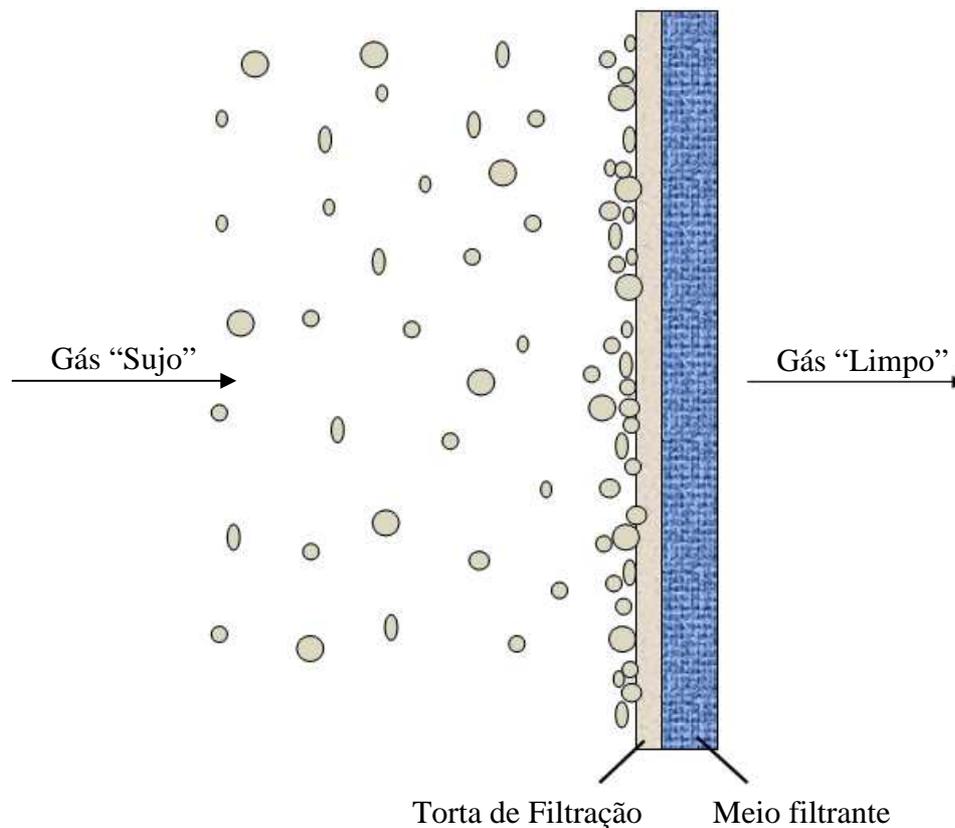


Figura 2.1 – Esquema do processo de filtração de gases.

Após certo tempo de operação, a torta que vai se formando passa a fazer parte do filtro e a eficiência de coleta aumenta. Entretanto, à medida que a torta se forma, a queda de pressão aumenta e a torta torna-se mais espessa. A formação de uma torta muito espessa é indesejável sendo necessária a limpeza periódica do filtro para remover a torta de filtração e manter a queda de pressão em níveis aceitáveis de operação. A máxima eficiência de coleta combinada à mínima queda de pressão resulta em uma melhor condição de filtração de pó (PASCHOAL; AGUIAR, 2008).

2.1.1. Mecanismos de coleta

A deposição de material pulverulento no meio filtrante ocorre devido à combinação de mecanismos de coleta, destacando-se (SVAROVSKY, 1981; MATTESON, 1986):

Impactação inercial: mecanismo resultante da inércia das partículas. Nesse mecanismo, as partículas tendem a colidir com a superfície da fibra do tecido do meio filtrante aderindo-se a ela.

Interceptação direta: mecanismo que depende do diâmetro da partícula. As partículas seguem o fluxo gasoso e, caso a trajetória do centro das partículas passe a uma distância de um raio de partícula da superfície, elas ficam retidas nas fibras.

Difusão: devido ao movimento browniano aleatório das partículas suspensas no gás, elas se chocam com a superfície da fibra. Esse tipo de mecanismo ocorre para partículas pequenas.

Mecanismo Gravitacional: o efeito da gravidade sobre partículas grandes causa um desvio na sua trajetória fazendo com que elas toquem a superfície das fibras.

Atração eletrostática: devido ao choque ou atrito que ocorre no processo de filtração, cargas eletrostáticas podem surgir nas partículas ou no coletor causando uma atração entre eles, aumentando a eficiência de coleta.

2.1.2. Meios filtrantes de tecido – tecidos utilizados em filtros manga

Filtros de manga são coletores de partículas que atuam na remoção de material pulverulento da corrente gasosa durante a filtração (SANCHES et al., 1997).

Há muitos anos utilizavam-se tecidos de fibra natural em filtros de manga, porém, a vazão de ar nestes filtros era limitada à, no máximo, 8 ft³/min. Em velocidades mais altas, o material pulverulento era mais compactado o que levava a uma grande queda de pressão e à quebra local da torta de filtração, permitindo uma penetração excessiva de pó no filtro. Mais recentemente, com o desenvolvimento dos tecidos sintéticos, maiores velocidades podem ser empregadas sem que haja penetração demasiada de material pulverulento. Os filtros de tecido sintético, por sua flexibilidade, apresentam maior durabilidade e facilidade de limpeza do que os de tecido de fibra natural (ITO, 2002).

Os tecidos mais empregados na confecção de filtros de manga são tecidos telados e os feltros (SVAROVSKY, 1981). Feltros de fibras sintéticas de náilon são freqüentemente utilizados com os pós-abrasivos. Os filtros de fibra de vidro são resistentes a altas temperaturas e possuem custo elevado. Por outro lado, os feltros de fibras de poliéster são resistentes e possuem um preço razoável (LINOYA et al., 1968; PERKINS, 1974; STRAUSS, 1975).

Para a escolha adequada do tecido a ser empregado no processo de filtração, devem ser observados alguns aspectos como: a compatibilidade do material utilizado na confecção do filtro com o material particulado verificando suas características físicas e químicas, a capacidade do tecido na liberação do pó coletado no ciclo de limpeza, sua resistência ao desgaste causado por abrasão, o tamanho das partículas do material pulverulento, a vazão do ar, a temperatura de operação, reações químicas do pó e do gás e a umidade da corrente gasosa.

Os tecidos podem ser confeccionados de maneira trançada e não trançada. Esses tecidos são descritos a seguir.

2.1.2.1. Tecidos trançados

Segundo a Associação Brasileira das Indústrias de Não Tecidos e Tecidos Técnicos (ABINT, 2009), os tecidos trançados são estruturas produzidas por entrelaçamento de um conjunto de fios dispostos na direção longitudinal (comprimento) e outro conjunto de fios dispostos na direção transversal (largura) do tecido. Os filtros de tecido trançado oferecem baixa resistência ao fluxo de gás e seu acabamento confere boa característica de liberação do pó coletado. Eles são utilizados em filtros manga com sistema de limpeza por fluxo de ar reverso e vibração mecânica, pois possuem grande resistência mecânica se comparados aos tecidos não trançados (TOGNETTI, 2007).

A Figura 2.2 mostra os diferentes tipos de entrelaçamentos utilizados na confecção destes tecidos.

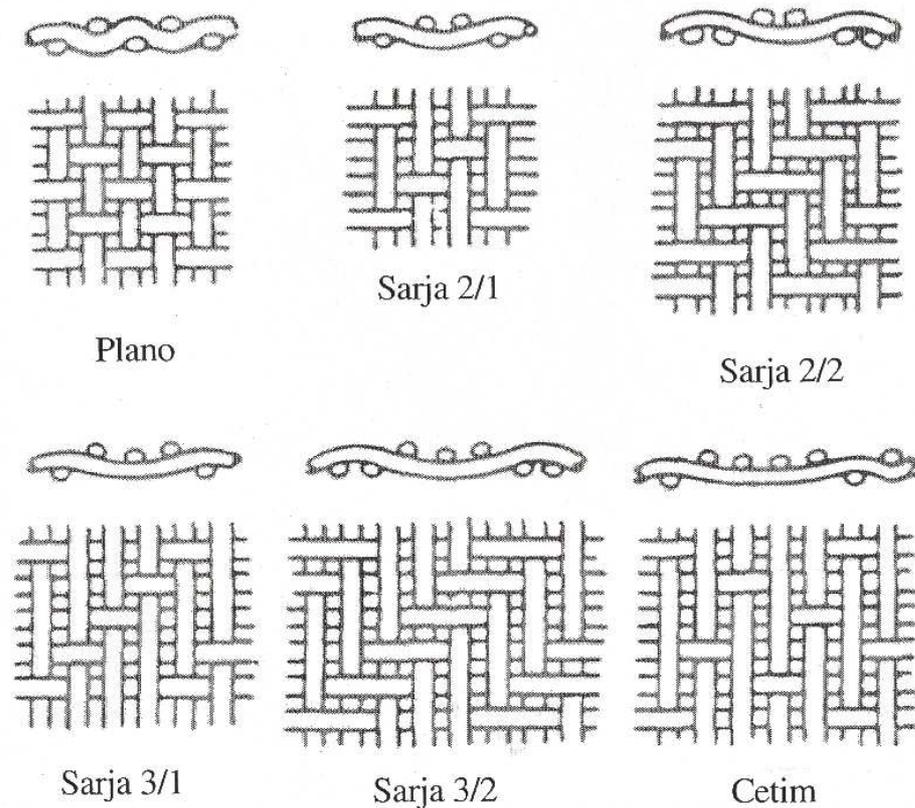


Figura 2.2 - Tipos de tecidos trançados. (Fonte: TOGNETTI, 2007).

2.1.2.2. Tecidos não trançados

Os tecidos não trançados ou feltros são feitos a partir de uma trama de fibras sem a preparação do fio requerida no entrelaçamento. As fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso. Eles são mais apropriados para filtros manga com sistema de limpeza por jato pulsante.

Os feltros exibem muito mais poros por unidade de área que os tecidos trançados. Dessa forma, a formação da torta neste tipo de tecido ocorre mais lentamente do que nos tecidos trançados.

Existem processos de tratamento de tecidos que podem melhorar a estabilidade do tecido, alterar as características da superfície do tecido ajustando sua capacidade de retenção e liberação de material particulado. O envernizamento ou envidramento, a escovação, chamuscagem, calandragem e impregnação química são alguns destes processos (AZEVEDO, 2009).

2.1.3. Mecanismos de limpeza

Quando a queda de pressão no filtro atinge o seu ponto máximo, a camada de pó depositada na superfície do meio filtrante tem que ser removida por alguma técnica de limpeza (DONOVAN, 1985). As técnicas mais utilizadas são: vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso (TANABE et al., 2008), brevemente descritas a seguir.

Vibração mecânica: método de limpeza de filtros mais antigo e de menor custo. Consiste na remoção do pó coletado na superfície do tecido através do uso de um motor que provoca a vibração mecânica das mangas. Essa técnica tem como vantagem um sistema de operação e montagem simples e como desvantagem a necessidade de interromper o processo de filtração para a limpeza.

Fluxo de ar reverso: neste tipo de sistema de limpeza, ar limpo é soprado através das mangas no sentido inverso ao da filtração para desalojar a camada de partículas (LORA, 2002). O ciclo de limpeza termina quando uma quantidade significativa de pó é extraída. Esta técnica também exige a interrupção da filtração. No entanto, ela permite um maior tempo de vida útil ao tecido devido ao menor impacto mecânico.

Pulso de ar reverso: nesta técnica, a torta é periodicamente removida por um pulso de ar comprimido através do tecido, causando uma repentina expansão das mangas fazendo com que o pó se desprenda. Sua vantagem é que a limpeza ocorre em frações de segundos, sem a necessidade de interrupção da filtração. A principal desvantagem deste método é que o tecido tem uma vida útil menor devido ao maior desgaste das fibras.

Assim como a queda de pressão no filtro, a remoção da torta depende das variáveis do processo. O grau de dificuldade de remoção da torta de pó depende das forças de adesão entre as partículas e o meio filtrante e de coesão entre as partículas. Essas forças estão relacionadas com a estrutura da torta, ou seja, com sua porosidade (NETO, 2002).

2.1.4. Forças de adesão e coesão

As forças que mantêm as partículas unidas sobre a superfície do filtro são: a adesão que representa as forças que mantêm as partículas sobre a superfície do filtro e a coesão que descreve as forças que mantêm as partículas unidas entre si (NETO, 2002). 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 (SILVA et al., 1999).

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 (DUECK et al., 2007).

2.2. Fundamentos da filtração

Como previamente mencionado, a filtração gás-sólido em meios filtrantes de tecido consiste basicamente na passagem de gás “sujo” através do tecido, onde as partículas se depositam aderindo-se à sua superfície.

As partículas dispersas, o meio de dispersão e o meio filtrante são os principais objetos que fazem parte do processo de filtração. As características mais importantes das partículas são: o diâmetro da partícula, sua distribuição granulométrica, sua forma, densidade e concentração mássica.

O escoamento do gás é caracterizado principalmente por sua velocidade, densidade, viscosidade e umidade.

As principais características do meio filtrante são sua área superficial de filtração, espessura do filtro e porosidade.

Os parâmetros de projeto do filtro mais relevantes são a queda de pressão no filtro, a eficiência de coleta e a força de adesão torta-tecido (AGUIAR, 1995).

2.2.1. Formação da torta de filtração

Geralmente os processos de formação de tortas de filtração acontecem em três etapas distintas: a filtração de profundidade, a etapa de transição e a filtração superficial.

Na filtração de profundidade, a princípio, as partículas penetram intensamente no interior do tecido, ficando retidas nos interstícios das fibras. A captura pode ocorrer por ação dos mecanismos de captura: gravidade, inércia, interceptação direta e mecanismos difusionais (THEODORE; BUONICORE, 1998).

Com o transcorrer da filtração e conseqüente aumento das partículas coletadas, inicia-se a etapa de transição, com a formação de dendritos. Estes dendritos são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante que passam a agir como novos elementos coletores (RODRIGUES, 2006).

Payatakes (1977) subdivide esta fase intermediária em duas, sendo que inicialmente ocorre a deposição de partículas sobre partículas e segue-se a fase em que estes

dendritos crescem e interagem com seus vizinhos, formando uma cobertura de espessura não uniforme ao redor da fibra, o que o autor denomina de matriz porosa interna.

Como resultado da formação destas estruturas, tem-se o acréscimo na taxa de queda de pressão e significativa diminuição da penetração das partículas através do filtro. Os dendritos formados constituem, finalmente, uma camada superficial de material particulado, denominado de torta de filtração.

A partir da existência da torta na superfície do tecido, tem-se a terceira fase da filtração. Esta fase é conhecida como filtração superficial, onde o meio filtrante passa a atuar como suporte para a torta, sendo esta capaz de remover as partículas mais finas da corrente gasosa por peneiramento ou por outros mecanismos. Desta forma, é interessante que se estabeleça a filtração superficial o quanto antes para que o sistema alcance maior eficiência de remoção (RODRIGUES, 2006).

O momento exato de formação da torta é difícil de ser obtido fisicamente, mesmo porque os tecidos não são materiais uniformes. Vários autores admitem um valor experimental para demarcar o ponto em que a torta se forma designado por ponto de colmatação. Este ponto pode ser entendido também como sendo a capacidade de retenção do meio (JAPUNTICH et al., 1997).

A colmatação é tanto mais rápida quanto menor forem as partículas envolvidas (WALSH; STENHOUSE, 1997) e quanto mais densamente empacotados forem os filtros utilizados (GRAEF et al., 1995; WALSH, 1996), uma vez que há um menor espaço disponível entre as fibras para a deposição do pó.

O aumento da espessura da torta resulta em um aumento da queda de pressão no sistema, tornando necessária a limpeza periódica do filtro para remover a mesma e manter a queda de pressão em níveis adequados de operação. O processo de filtração, portanto, ocorre através de vários ciclos de filtração e limpeza.

2.2.2. Queda de pressão

À medida que as partículas são retidas na superfície do meio filtrante durante os ciclos de filtração, há a formação da torta de pó e conseqüente aumento da queda de

pressão através do filtro. A queda de pressão ou perda de carga é a principal forma de consumo de energia do processo (NETO, 2002).

Este parâmetro é muito importante, uma vez que determina a frequência de limpeza do filtro e, conseqüentemente, afeta o tempo de vida do tecido (JEON; JUNG, 2004). Além disso, a máxima queda de pressão, antes da limpeza, pode ser empregada para determinar a potência requerida no sistema. Os valores das perdas de carga operacionais são geralmente na faixa de 750 a 2000 Pa (SEVILLE, 1997).

A queda de pressão residual tende a aumentar após cada ciclo, pois partículas do material pulverulento ficam presas no tecido diminuindo a porosidade na superfície do meio filtrante (MAUSCHITZ et al., 2007). Após vários ciclos, este valor tende a se estabilizar, pois o tecido fica saturado de pó. O tempo de saturação do tecido depende do tipo de material do filtro, do tamanho das partículas e do tempo e tipo de remoção da torta (CALLÉ et al., 2002).

Existem diferentes equações para descrever a queda de pressão durante a filtração. Uma delas é uma aproximação cumulativa, onde a queda de pressão total no filtro é dividida em duas partes: a queda de pressão no meio filtrante, ΔP_m e a queda de pressão devido à torta de pó formada, ΔP_t (STANGHELLE et al., 2007). Logo, a pressão total é dada pela Equação (2.1).

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_t \quad (2.1)$$

2.2.2.1. Lei de Darcy

O escoamento através dos meios porosos é semelhante ao escoamento através de leitos sólidos granulares. Dessa forma, o comportamento geral da queda de pressão (ΔP) em função da velocidade superficial de filtração (V_f) é gradual na transição do escoamento laminar a turbulento. Assim, um termo viscoso e um termo inercial devem ser utilizados para se obter a Equação (2.2), que é utilizada para o escoamento de um fluido incompressível.

$$\frac{\Delta P}{L'} = \alpha \cdot \mu \cdot V_f + \beta \cdot \rho_g \cdot V_f^2 \quad (2.2)$$

Nessa equação, ΔP é a queda de pressão, L' é a espessura do meio filtrante, α é o coeficiente de resistência viscosa, β é o coeficiente de resistência inercial, μ é a viscosidade do fluido, ρ_g é a densidade do fluido e V_f é a velocidade superficial de filtração. O primeiro termo do lado direito da Equação (2.2) é chamado viscoso e o segundo é chamado inercial.

Para o escoamento puramente viscoso, o segundo termo da Equação (2.2) torna-se desprezível e obtém-se a Equação (2.3), conhecida como equação de Darcy para meios porosos:

$$\frac{\Delta P}{L'} = \alpha \mu V_f \quad (2.3)$$

onde a razão $1/\alpha$ é denominada coeficiente de permeabilidade. Se a torta é considerada incompressível e o fluido newtoniano e incompressível, pode-se substituir a expressão $1/\alpha \cdot \mu$ por uma constante B na Equação (2.3), obtendo-se:

$$\frac{\Delta P}{L'} = \frac{V_f}{B} \quad (2.4)$$

2.2.2.2. Queda de pressão através do meio filtrante

O meio filtrante é constituído pelo tecido que possui espessura (L') constante. Nesse caso, a equação que descreve a queda de pressão no meio filtrante pode ser reescrita a partir da Equação (2.4), como:

$$\Delta P_m = K_1 V_f \quad (2.5)$$

onde $K_1 (= L/B)$ é a resistência específica do tecido e pode ser considerada constante, uma vez que a espessura do tecido e o coeficiente de permeabilidade do tecido não variam com o tempo de filtração.

2.2.2.3. Queda de pressão através da torta de filtração

A espessura da torta (L) varia com o tempo de filtração e pode ser calculada se a densidade da partícula (ρ_p) e a porosidade da torta (ε) forem conhecidas, através da massa de pó depositada por unidade de área (W):

Admitindo-se que a torta é incompressível (possui permeabilidade e porosidade constantes), tem-se:

$$W = \rho_p (1 - \varepsilon) L \quad (2.6)$$

e, portanto:

$$L = \frac{W}{\rho_p (1 - \varepsilon)} \quad (2.7)$$

Substituindo a Equação (2.7) na Equação (2.3) e rearranjando os termos, tem-se:

$$\Delta P_t = K_2 V_f W \quad (2.8)$$

nessa equação $K_2 (= 1/(\rho_p (1 - \varepsilon) B))$ é a resistência específica da torta, geralmente considerada constante para tortas incompressíveis na filtração de gases. No entanto, alguns pesquisadores (SCHMIDT; LÖFFLER, 1991; AGUIAR, 1995) demonstraram que, durante o processo de filtração, a porosidade das tortas não permanece constante.

2.2.3. Velocidade superficial de filtração

A velocidade superficial de filtração é um dos parâmetros mais importantes na filtração de gases, pois está diretamente relacionada ao tempo necessário para a filtração, ao desgaste do tecido e à profundidade que o material particulado consegue penetrar no tecido. Além disso, este parâmetro influencia na queda de pressão residual, ou seja, a queda de pressão após a limpeza do filtro antes de se iniciar uma nova etapa de filtração (TOGNETTI, 2007).

Dessa forma, a velocidade superficial de filtração é influente no custo inicial do equipamento e no custo operacional. Assim, valores intermediários de velocidade superficial de filtração devem ser utilizados. Recomenda-se operar os sistemas de filtração com velocidades variando entre 0,5 e 10 cm/s (LEITH; ALLEN, 1986).

A velocidades baixas, aproximadamente 0,5 cm/s, tem-se um maior consumo de energia, já que o tempo de retenção das partículas seria maior (DONOVAN, 1985). Uma vantagem para se trabalhar com altas velocidades de filtração, aproximadamente 10 cm/s, é que há uma redução da área de filtração utilizada, diminuindo não só o custo inicial, mas também o custo operacional e de manutenção do meio filtrante. Todavia, o tempo de filtração é pequeno e a penetração das partículas no tecido é maior, o que dificulta a remoção da torta, além de aumentar a queda de pressão durante a filtração e após a remoção da torta tornando a vida útil do tecido menor.

2.2.4. Porosidade das tortas de filtração

A porosidade de tortas de filtração é um parâmetro estrutural muito importante, pois tanto a queda de pressão no filtro durante o processo de filtração quanto a resistência ao escoamento e a força necessária para a remoção da torta dependem dessa propriedade. Ela está relacionada à compressibilidade da torta. A compressibilidade da torta de pó é uma característica que leva à sua compactação resultando na redução da porosidade, bem como em um aumento da queda de pressão através da torta (KIM et al., 2008) e muitos autores verificaram a compressão da torta durante a filtração (AGUIAR; COURY, 1996; CHOI et al., 2004a; ENDO et al., 1998).

Choi et al. (2004a) considerando um modelo de deposição de pó por camadas finas, explica que, à medida que a carga mássica aumenta, as camadas mais inferiores (mais próximas ao tecido) são comprimidas pela força de arraste causada pela queda de pressão através das camadas superiores. Este modelo considera que a torta de filtração seja dividida em várias camadas finas tendo a espessura de uma torta depositada em um determinado intervalo de tempo, Δt_i , que corresponde à espessura ΔL_i .

Inicialmente, a primeira camada de espessura L_1 é formada na superfície do meio filtrante. No próximo intervalo de tempo, a segunda camada é formada sobre a primeira. Assim, a primeira camada é comprimida pela força de arraste desenvolvida pela queda de pressão através da nova camada e, então, sofre um “encolhimento”. Quando a terceira camada é formada, a primeira é mais encolhida que segunda pelas forças de compressão advindas da soma das duas camadas superiores. Consequentemente, a porosidade e a espessura das camadas formadas previamente são reduzidas pelo aumento da carga mássica. No entanto, a taxa de aumento da espessura torna-se constante depois de certa carga mássica, pois a camada de pó sob certa espessura torna-se incompressível.

A Figura 2.3 mostra um esquema de como a compressão da torta aparece para uma curva de espessura da torta por carga mássica.

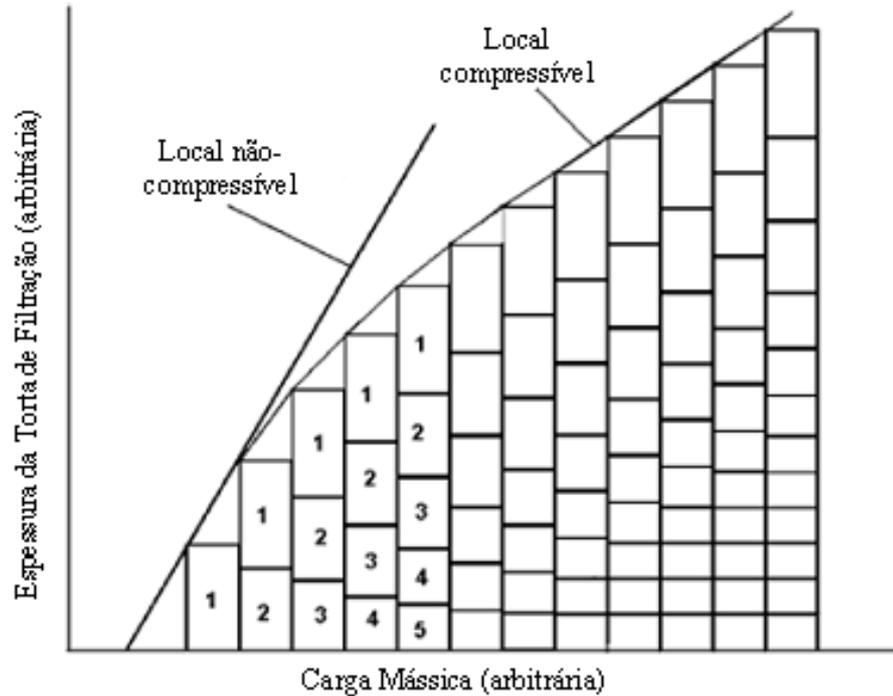


Figura 2.3 – Esquema para explicar a redução da espessura da torta pelo efeito da compressão (Adaptado de CHOI et al., 2004a).

Apesar da importância de se estudar a propriedade de compressibilidade das tortas de filtração, há relativamente poucos trabalhos que investigam as propriedades de compressão, pois é muito difícil medir a porosidade da torta experimentalmente, devido à fragilidade da torta de pó (CHOI et al., 2004b).

Dessa forma, é possível estimar a porosidade de tortas de filtração a partir de equações encontradas na literatura que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido (método indireto). Esse parâmetro também pode ser determinado experimentalmente a partir de observação em microscópio (método direto). Os dois métodos são descritos nos próximos itens.

2.2.4.1. Método indireto

A seguir são citadas algumas equações encontradas na literatura para estimar a porosidade de tortas de filtração de gases.

Equação de Ergun: A queda de pressão em um leito poroso, devido ao escoamento de um fluido pode ser estimada utilizando a equação clássica de Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 (1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75 (1 - \varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.9)$$

onde ρ_g é a densidade do gás, μ é a viscosidade do gás, ε a porosidade da torta, V_f a velocidade superficial de filtração, d_p o diâmetro médio das partículas e L a espessura da camada porosa, no caso, a torta.

A espessura da torta pode ser determinada por:

$$M = Q t = L A \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (2.10)$$

sendo M a massa da torta, Q a vazão mássica de pó, A a área superficial da torta, ρ_p a densidade das partículas e t o tempo de filtração.

Isolando-se L na Equação (2.10) e substituindo na Equação (2.9), tem-se a equação de Ergun modificada:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150 Q \mu V_f (1 - \varepsilon)}{A \rho_p d_p^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75 Q \rho_g V_f^2}{A \rho_p d_p \varepsilon^3} \quad (2.11)$$

A Equação (2.11) pode ser usada para estimar a porosidade da torta a partir de dados de ΔP vs. t medidos experimentalmente (AGUIAR, 1995; SILVA, et al., 1999).

Equação de Kozeny-Carman: esta equação é bastante utilizada para calcular a queda de pressão através da deposição da torta sobre um meio filtrante (CHENG; TSAI, 1998).

Kozeny-Carman (1956), assumindo que o meio poroso pudesse ser representado por capilares, cuja superfície iguala-se àquela das partículas que compõe o meio, e fixando o volume capilar igual ao volume de vazios do meio, propôs a equação:

$$\Delta P = \frac{18 \mu V_f Q t}{A d_p^2 \rho_p c'} + \frac{2 K_{CK}(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.12)$$

na qual ΔP é a queda de pressão, c' o fator de correção de Cunningham, μ é a viscosidade do fluido e ρ_p é a densidade da partícula e d_p é o diâmetro médio das partículas. A constante empírica (K_{CK}) é usualmente igual a 4,8 para partículas de formato esférico e 5,0 para partículas irregulares.

O fator de Cunningham pode ser obtido para gases em escoamento viscoso sobre esferas por meio da equação:

$$c' = \left\{ 1 + \frac{2 \lambda}{d_p \left[1,275 + 0,4 \exp\left(\frac{-1,10 d_p}{2 \lambda}\right) \right]} \right\} \quad (2.13)$$

sendo λ o livre caminho médio das moléculas do gás.

Equação de MacDonald: MacDonald et al. (1979) realizaram algumas modificações na equação de Ergun (Equação 2.9) de modo a considerar a rugosidade das partículas, aumentando, assim, a faixa de abrangência daquela equação. Dessa forma, dois modelos foram propostos:

um modelo para partículas rugosas, descrito pela Equação (2.14):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 (1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{4,0 (1 - \varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.14)$$

e um modelo para partículas não-rugosas, descrito pela Equação (2.15):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 (1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,8 (1 - \varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.15)$$

Equação proposta por Endo et al. (1998): Os autores propuseram uma equação onde consideraram o formato das partículas e a não homogeneidade do material particulado como fatores que influenciam a porosidade da torta de filtração. A equação pode ser descrita por:

$$\frac{\Delta P_t}{L} = \frac{180 k (1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_g^2 \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \quad (2.16)$$

onde ΔP_t é a queda de pressão através da torta, σ_g é o desvio padrão do diâmetro médio geométrico das partículas e d_g é o diâmetro médio geométrico. Nesta equação, foram incluídos o fator de forma dinâmico, k , e a influência da dispersão dos tamanhos das partículas que compõe o material particulado $4 \ln^2 \sigma_g$. O fator de forma dinâmico (k) de uma partícula é definido como a razão entre a força de arraste agindo na partícula em uma dada velocidade e a força de arraste agindo em uma esfera de mesmo volume em uma mesma velocidade (ENDO et al. 1998) e pode ser calculado por:

$$k = \frac{c'_e}{c'_s} \left(\frac{d_e}{d_s} \right)^2 \quad (2.17)$$

em que, d_e é o diâmetro de uma esfera equivalente, d_s é o diâmetro de Stokes e c' é o fator de correção de Cunningham para os diâmetros d_e e d_s .

Substituindo a espessura da torta, Equação (2.10), na Equação (2.16), a equação proposta por Endo et al. modificada, pode ser escrita por:

$$\Delta P_t = \frac{180 k (1 - \varepsilon) \mu V_f}{\varepsilon^3 d_g^2 \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \frac{Qt}{A \rho_p} \quad (2.18)$$

Aguiar e Coury (1996) concluíram que a porosidade média estimada pelas equações encontradas na literatura diminuiu com o aumento do diâmetro da partícula.

Lucas (2000) e Ito (2002) utilizaram a equação de Ergun e concluíram que a porosidade da torta de filtração diminui com o aumento da velocidade superficial de filtração.

Endo et al. (2001) determinaram a porosidade de tortas de filtração de gases, para diferentes tipos de materiais pulverulentos, trabalhando com materiais compostos por partículas esféricas monodispersas e outros materiais compostos de partículas com formatos irregulares polidispersos. Eles concluíram que as partículas esféricas monodispersas possuem menores valores de porosidade, enquanto que as partículas de formatos irregulares e cúbicos possuem maiores valores de porosidade.

2.2.4.2. Método direto

Como mencionado anteriormente, a torta de pó formada na superfície do meio filtrante é bastante frágil, o que dificulta seu manuseio e, portanto, a determinação quantitativa de sua porosidade. Na tentativa de obter experimentalmente valores de porosidade de tortas de filtração de gases, Aguiar (1995) desenvolveu uma técnica adaptada de um trabalho realizado por Schmidt e Löffler (1990) denominada método direto.

Nesta técnica, a torta de filtração passa por um processo de pré-endurecimento pela passagem de um adesivo instantâneo arrastado por um fluxo de ar úmido. Segundo Aguiar (1995), essa etapa é muito importante para que não ocorra um rearranjo de partículas na torta modificando a sua estrutura durante a etapa seguinte que consiste na penetração de um agente embutidor na estrutura, preenchendo todos os poros da camada de material particulado, sem causar variações na sua estrutura.

Na etapa seguinte, a torta já endurecida é seccionada em retângulos que são introduzidos em moldes cilíndricos de PVC com uma resina termo rígida.

Posteriormente, as amostras são esmeriladas e polidas. Por fim, elas são levadas ao microscópio eletrônico de varredura para obtenção de microfotografias.

As imagens obtidas são, então, analisadas em um programa de tratamento de imagens onde a binarização das mesmas é possível. Após a binarização, as imagens são vistas apenas em dois níveis de cores permitindo, assim, que a área de pontos brancos (partículas) e de pontos escuros (espaços vazios) seja determinada. Dessa forma, a porosidade é dada pela razão da área de espaços vazios pela área total examinada.

Em seu estudo, Aguiar (1995) determinou a porosidade de tortas formadas por calcário dolomítico e concluiu que a porosidade da torta se altera durante o processo de filtração, sendo, portanto, a torta compressível. Mostrou também que a porosidade é maior na interface torta-ar do que na interface torta-tecido. Verificou que as equações da literatura podem ser utilizadas na estimativa da porosidade média, entretanto, o método direto é mais indicado quando for necessário conhecer o comportamento da porosidade com a posição da torta.

Ito e Aguiar (2009) obtiveram dados da porosidade em função da velocidade superficial de filtração utilizando um microscópio óptico ao invés de um MEV para geração das imagens de tortas formadas por polvilho doce, amido de milho e concentrado fosfático. Além de concluir que a porosidade diminui com o aumento da velocidade superficial de filtração, as autoras observaram que partículas esféricas resultaram em menores valores de porosidade enquanto as partículas com formatos irregulares resultaram em maiores valores de porosidade.

2.5. Propriedades da partícula

O projeto e a operação de equipamentos industriais dependem do estudo das propriedades de materiais particulados (GELDART, 1990). Segundo Svarovsky (1990), a caracterização das propriedades primárias da partícula e a correlação com as propriedades secundárias do sistema particulado como um todo são problemas comuns do estudo sobre materiais particulados (SVAROVSKY, 1990). A Tabela 2.1 a seguir, mostra algumas das propriedades primárias e a relação com as propriedades secundárias:

Tabela 2.1: Propriedades primárias das partículas do material e secundárias do material (Modificada de Azevedo, 2009).

PROPRIEDADES PRIMÁRIAS	
Partícula	Material Particulado
Tamanho	Distribuição granulométrica, diâmetro médio
Forma	Distribuição: forma em função do tamanho de partícula (média).
Densidade	Distribuição: densidade em função do tamanho de partícula. Densidade média.
Área Superficial da Partícula	Área superficial total
PROPRIEDADES SECUNDÁRIAS	
Material Particulado	
Rigidez	Propriedades do escoamento e manuseio.
Resistência	Empacotamento
Dureza	Tratamento do material: moagem, polimento, etc.
Porosidade	Permeabilidade

2.5.1. Tamanho das partículas

A determinação do tamanho da partícula deve ser precedida pela definição do parâmetro que será utilizado para tal e de como serão apresentados os dados da distribuição (SVAROVSKY, 1990).

A escolha dos parâmetros que representam o tamanho de partícula depende do formato da mesma. O tamanho de uma partícula esférica homogênea é definido unicamente por seu diâmetro, enquanto que para uma partícula cúbica o único parâmetro necessário é a dimensão da aresta. Para partículas irregulares, o tamanho de partícula depende do método escolhido para realizar a medida sendo os mais comuns: a área projetada, área superficial, o diâmetro, etc. (ALLEN, 1997).

É possível observar e medir partículas através de análise microscópica. Utilizando o microscópio pode-se medir o diâmetro de cada partícula individualmente e, ao dividi-lo pelo número total de partículas, obtém-se o diâmetro médio, ou seja, um único número que representa a partícula ou o tamanho de partícula (AZEVEDO, 2009). No entanto, deve-se ter muita cautela ao fazer conversões entre número único, comprimento, volume e massa médios. Se o dado desejado for massa ou volume médio, será necessário fazer a

conversão entre o número médio para a massa média. Matematicamente é muito simples, entretanto essa conversão pode aumentar muito o erro da medida (RAWLE, 2005).

De acordo com Rawle (2005), a descrição de um objeto tridimensional com apenas um número é o fator que imprime maior dificuldade na determinação do tamanho de partícula. Assim, vários tipos de diâmetros de partícula são utilizados na caracterização do tamanho das partículas. A Tabela 2.2 traz a definição de alguns desses diâmetros.

Tabela 2.2 – Tipos de diâmetros e suas definições (Modificada de Allen, 1997).

DENOMINAÇÃO (Diâmetro)	DEFINIÇÃO
Volumétrico	Diâmetro de uma esfera de mesmo volume que a partícula em questão.
Superficial	Diâmetro de uma esfera de mesma área superficial que a partícula em questão.
Queda Livre	Diâmetro de uma esfera de mesma densidade e mesma velocidade de queda livre que a partícula em um fluido de mesma densidade e viscosidade.
Stokes	Diâmetro de queda livre de uma partícula em uma região de fluxo laminar ($Re < 0,2$).
Feret	Distância média entre pares de linhas paralelas tangentes ao contorno da partícula.
Peneira	Tamanho equivalente à menor abertura através da qual a partícula consegue passar.
Arraste	Diâmetro de uma esfera que oferece a mesma resistência ao movimento que a partícula em questão em um fluido com mesma velocidade e viscosidade.
Área Projetada	Diâmetro de um círculo de mesma área que a área projetada da partícula.
Perímetro	Diâmetro de um círculo de mesmo perímetro que o projetado pela partícula.

O tamanho de partícula é comumente representado através de distribuição cumulativa. No gráfico de distribuição, a abscissa representa o tamanho de partícula e a ordenada a porcentagem (menor ou maior que o tamanho). Através desse tipo de distribuição, pode-se ler o tamanho médio e a porcentagem entre dois tamanhos.

Ao realizar ensaios de filtração com o concentrado fosfático e polvilho doce com diferentes diâmetros, Rodrigues (2006) observou que o maior diâmetro de partículas

resultou em uma melhor acomodação tanto interna (refletida no maior tempo de filtração interna) quanto superficial da torta, uma vez que a resistência específica da torta de partículas grossas foi inferior àquela apresentada pela torta constituída por partículas finas. Aguiar e Coury (1996) relataram essa mesma influência do diâmetro. Os autores concluíram que as partículas de maiores diâmetros efetuam um recobrimento menos eficiente das fibras, resultando em uma menor queda de pressão. As partículas menores da distribuição controlam muitos aspectos dos ciclos de filtração, pois são elas que penetram no tecido no início da filtração e formam a torta de filtração. São as partículas pequenas que mais contribuem com a área superficial das partículas e com a resistência específica da torta de filtração (WAKEMAN, 2007).

2.5.2. Formato das partículas

O formato das partículas é uma propriedade fundamental que afeta o empacotamento de partículas, e, portanto características como a densidade, porosidade, permeabilidade, coesão e o comportamento da torta de filtração (ALLEN, 1997). Existem vários métodos para analisar a forma das partículas, dentre os quais se encontram o uso de diversos coeficientes e fatores de forma, curvatura, descrição por meio de formas sólidas, funções matemáticas, dimensões fractais entre outros (SVAROVSKY, 1990). O formato pode ser determinado por um número, superfície ou volume.

Os termos geralmente utilizados para definir a forma de uma partícula (esférica, irregular, arredondada, dentre outros) não são adequados para determinar o fator de forma da partícula, pois não podem ser inseridos em equações que necessitem desse parâmetro. A relação numérica entre várias medidas da partícula dependem da sua forma e uma relação adimensional dessas medidas é chamada fator de forma. A relação entre as dimensões medidas da partícula e seu volume ou área superficial é chamada coeficiente de forma (ALLEN, 1997).

Os fatores de forma geralmente utilizados para caracterizar as partículas são sua circularidade, aspecto e convexidade.

A circularidade quantifica o quanto o formato da partícula projetada se aproxima de um círculo perfeito. Ela é definida como a relação entre o perímetro de um

círculo de mesma área (A) da partícula de interesse dividido pelo perímetro da imagem da partícula (P). A Equação (2.19) representa a expressão utilizada para o cálculo desse parâmetro.

$$Circularidade = \frac{4 \pi A}{P^2} \quad (2.19)$$

O valor desse parâmetro varia entre 0 e 1, sendo que um círculo perfeito tem circularidade 1.

O aspecto é definido como a relação entre o diâmetro mínimo (D_{\min}), e o diâmetro máximo (D_{\max}) da partícula e está representado pela Equação (2.20).

$$Aspecto = \frac{D_{\min}}{D_{\max}} \quad (2.20)$$

Esse parâmetro também varia entre 0 e 1. Partículas simétricas em todos os eixos, assim como um círculo ou um quadrado, terão o aspecto igual a 1.

A convexidade da partícula (representada pela Equação 2.21) possibilita a quantificação da rugosidade superficial da partícula e é medida por meio da relação entre o perímetro convexo da partícula (P_{convex}) e o perímetro real da partícula (P).

$$Convexidade = \frac{P_{convex}}{P} \quad (2.21)$$

Esse parâmetro varia entre 0 e 1, sendo que uma partícula não rugosa possui convexidade igual a 1.

Ito e Aguiar (2009) ao estudarem a porosidade de tortas formadas por polvilho doce, amido de milho e concentrado fosfático concluíram que o formato das partículas juntamente com sua distribuição granulométrica foram as variáveis mais importantes na formação das tortas.

Lucas (2000) realizou ensaios de filtração utilizando polvilho, concentrado fosfático e talco, sendo que os dois últimos possuíam densidades e distribuições granulométricas muito próximas. O autor atribuiu a menor porosidade da torta formada pela rocha ao formato mais regular das partículas quando comparado ao talco.

Boskovic et al. (2005) investigaram a influência da forma das partículas na filtração utilizando nano partículas, esféricas e cúbicas. Os resultados mostraram que a eficiência da filtração foi bem diferente entre os dois tipos de partículas, sendo menor para as partículas cúbicas e essa diferença aumentou com o aumento do tamanho das partículas. Os autores concluíram que a razão para a diferença estava no movimento das partículas ao longo da superfície das fibras do tecido. As partículas esféricas depois de tocarem a fibra podem deslizar ou rolar e as partículas cúbicas apenas deslizam ou “tombam”. As partículas cúbicas podem tocar a fibra com as laterais ou com as arestas, o que muda significativamente a superfície de contato entre a fibra e a partícula e aumenta a possibilidade da partícula não ficar retida na fibra.

2.6. Material Particulado

Neste trabalho foram utilizados dois materiais pulverulentos: o concentrado fosfático e o silicato de magnésio (talco).

2.6.1. Concentrado fosfático (Rocha fosfática)

O concentrado fosfático é a matéria-prima mais importante para a fabricação de fertilizantes usados na agricultura sendo seus principais componentes o pentóxido de difósforo (P_2O_5) e o óxido de cálcio (CaO). O fósforo é um elemento essencial à nutrição de plantas e animais fazendo parte do grupo dos macronutrientes primários: nitrogênio, fósforo e potássio, os quais são imprescindíveis para o desenvolvimento das plantas. Portanto, o concentrado fosfático é utilizado mundialmente na agricultura. Não existe substituto para o fósforo na agricultura, sendo que as rochas fosfáticas são sua única fonte. (SOUZA; CARDOSO, 2007).

A Tabela 2.3 mostra as reservas e a produção mundiais de rocha fosfática no ano de 2008.

Tabela 2.3 – Reservas mundiais em 2008 e produção mundial de rocha fosfática em 2008 e 2009 (Adaptada de UGS – em www.ugs.gov e de SOUZA; FONSECA, 2008; acesso em 17/01/2011).

Discriminação	Reservas (10^3 t P_2O_5)		Produção (10^3 t)		
	2008 ⁽¹⁾	%	2008 ^(r)	2009 ^(p)	(%)
Países					
Brasil ⁽²⁾	370.000	0,8%	6.200	6.000	3,8%
África do Sul	2.500.000	5,3%	2.290	2.300	1,5%
Austrália	1.200.000	2,6%	2.800	2.500	1,6%
Canadá	200.000	0,4%	950	900	0,6%
China	10.000.000	21,3%	50.700	55.000	34,8%
Egito	760.000	1,6%	3.000	3.300	2,1%
Estados Unidos	3.400.000	7,2%	30.200	27.200	17,2%
Israel	800.000	1,7%	3.090	3.000	1,9%
Jordânia	1.700.000	3,6%	6.270	6.000	3,8%
Marrocos e Oeste Saara	21.000.000	44,7%	25.000	24.000	15,2%
Rússia	1.000.000	2,1%	10.400	9.000	5,7%
Senegal	160.000	0,3%	700	700	0,4%
Síria	800.000	1,7%	3.220	3.000	1,9%
Togo	60.000	0,1%	800	800	0,5%
Tunísia	600.000	1,3%	8.000	7.000	4,4%
Outros países	2.200.000	4,7%	7.440	7.000	4,4%
Total (arredondado)	47.000.000	100,0%	161.000	158.000	100,0%

Notas: (1) nutrientes em P_2O_5 ; (2) reservas medidas e indicadas; (r) revisado; (p) dados preliminares.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2009), no Brasil há uma carência dos principais insumos para a fabricação de fertilizantes, pois existe um alto custo dos insumos agropecuários. A comercialização de fertilizantes agrícolas no país, o andamento dos pedidos de alvarás de autorização de pesquisa e lavra em todo território nacional e a produção e o planejamento da expansão de produção de insumos para a fabricação de fertilizantes precisam de um planejamento estratégico para indústria de rocha fosfática, bem como o aproveitamento econômico de suas reservas.

A Figura 2.4 (a) mostra uma mina de extração, (b) uma usina de beneficiamento da rocha fosfática e (c) o produto já beneficiado.



Figura 2.4 – (a) Mina de extração, (b) usina de beneficiamento da rocha fosfática e (c) o produto já beneficiado. Fonte (a): Codemig (www.codemig.com.br, acesso em 07/12/2009); (b): Serrana Fertilizantes (www.serrana.com.br, acesso em 07/12/2009) e (c): MF Rural (www.mfrural.com.br, acesso em 08/12/2009).

Apenas um estudo médico sobre doenças relacionadas ao concentrado fosfático foi encontrado. Neste estudo, Capitani (1989) investigou a ocorrência de pneumoconiose (doença causada pela deposição de partículas finas nos pulmões) em trabalhadores expostos a rocha fosfática na região de Paulínia/SP. Encontrou-se uma prevalência de 27,4 % com 20 casos diagnosticados em 73 trabalhadores. No entanto, segundo o Manual de Procedimentos para os Serviços de Saúde do Ministério da Saúde (2001), a pneumoconiose causada por exposição à rocha fosfática é benigna, sem fibrose.

Ainda, de acordo com o site MEDIPÉDIA (www.medipedia.pt, acesso em 08/12/2009), quando uma pessoa, na sua atividade ou profissão, inala repetidamente ar repleto de determinado tipo de partículas finas durante longos períodos, os mecanismos de defesa do corpo podem tornar-se insuficientes. Neste caso, um número progressivamente maior de partículas deposita-se no tecido pulmonar, provocando lesões que caracterizam os vários tipos de pneumoconioses.

2.6.2. Silicato de magnésio (Talco)

O talco ou silicato de magnésio de fórmula química $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$ é um mineral cujas principais propriedades tecnológicas que o tornam largamente utilizado na indústria são: alta resistência ao choque térmico, leveza, suavidade, brilho intenso, alto poder de lubrificação e deslizamento, alta capacidade de absorção de óleo e graxa, baixa condutibilidade térmica e elétrica, alta área de superfície, inércia química e boa retenção como carga. Essas propriedades fazem do talco um importante mineral industrial, com vasto campo de aplicação. Ele é usado em várias indústrias, como cerâmica, papel, plásticos, borracha, pintura, rações, farmacêutica, construção e cosmética, entre outras (PONTES; ALMEIDA, 2005).

O Brasil encontra-se entre os principais produtores mundiais de talco, embora disponha apenas de reservas moderadas (da ordem de 117 milhões de toneladas), denotando condições de auto-suficiência sob o ponto de vista quantitativo. Sob o ponto de vista qualitativo, o que se verifica é que o talco brasileiro sofre somente operações elementares de beneficiamento, tais como britagem e moagem, sendo que a maior parte da produção se destina ao uso cerâmico. A pequena fração de talco produzida para usos mais nobres é proveniente de uma lavra seletiva e, antes de ser comercializada, é submetida apenas a uma secagem e moagem (PONTES; ALMEIDA, 2005).

De acordo com Souza Jr. et al. (2003), são reconhecidas quatro diferentes formas de doença pulmonar causada pelo talco. Três delas estão relacionadas à aspiração e se diferenciam, entre si, pela composição do pó aspirado. Assim, o talco aspirado pode ser puro (talcoose), estar associado a partículas de sílica (talcoossilicose), ou a fibras de asbesto

(talcoasbestose). A última forma é aquela devida à administração do talco por via endovenosa, geralmente observada em pacientes que fazem uso endovenoso de medicamentos orais.

A Figura 2.5 (a) mostra a etapa de extração do talco numa jazida, (b) uma foto do talco antes do seu processamento e (c) o talco já beneficiado em sua forma pulverulenta.

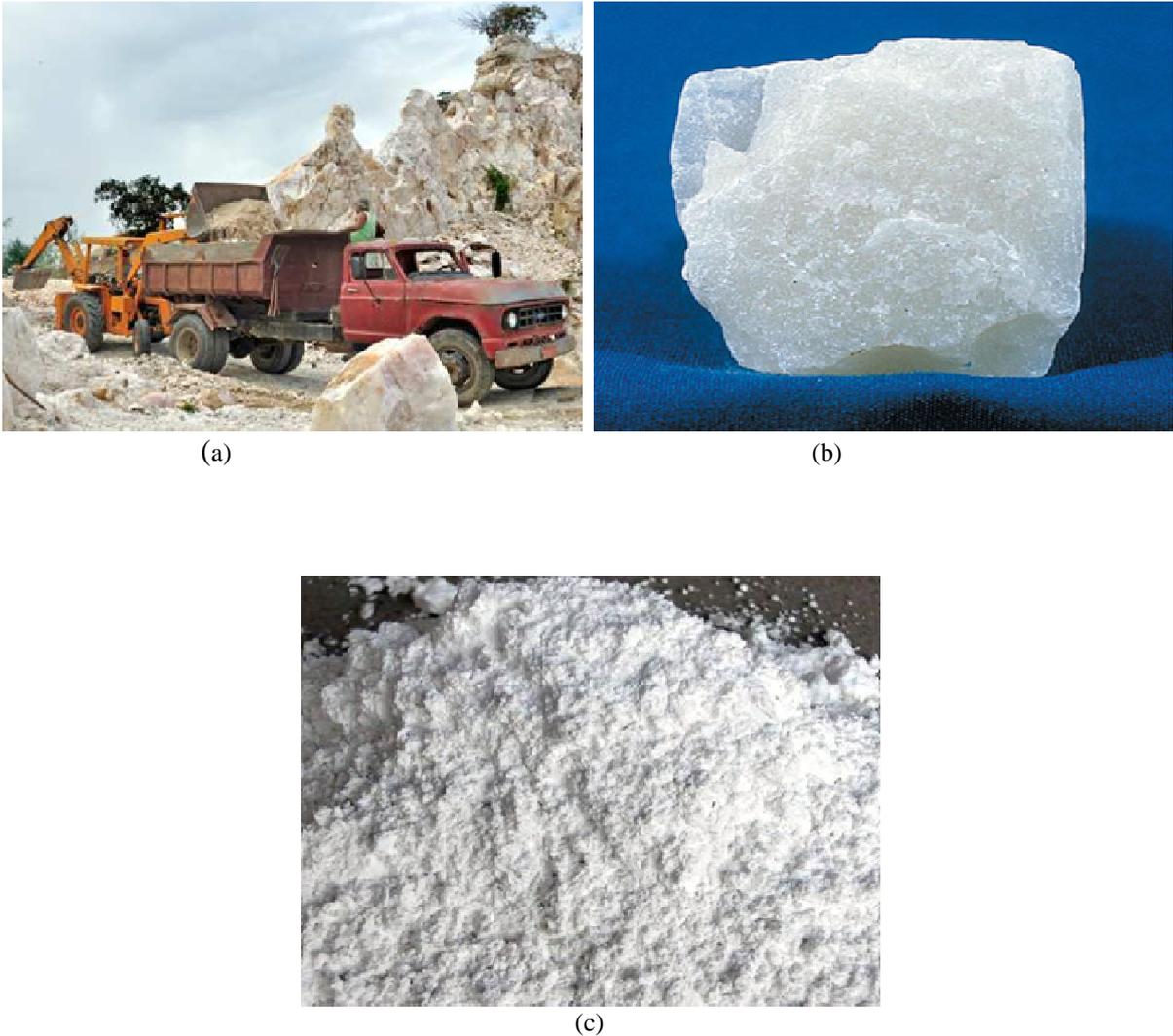


Figura 2.5 – Talco: (a) extração; (b) forma antes do processamento e (c) talco processado (pó). Fonte: (a): www.obeabadosertao.com.br (acesso em 08/12/2009); (b): Wikipédia (www.pt.wikipedia.org, acesso em 05/12/2009) e (c): Alibaba.com (www.alibaba.com, acesso em 05/12/2009).

2.7. Estudos relacionados à porosidade/compressibilidade de tortas de filtração

A queda de pressão é dependente de muitos fatores que surgem do projeto do filtro, das partículas a serem removidas e das propriedades do gás, bem como das condições operacionais. A propriedade de compressão da torta acumulada na superfície do filtro leva à compactação da camada de pó resultando na redução da porosidade da torta e a um aumento da queda de pressão através da mesma (KIM et al., 2008). De acordo com Jeon e Jung (2004), apesar da crescente importância da tecnologia de filtração por tecido no campo do controle da poluição do ar, ela não é completamente compreendida por causa de dificuldades de analisar o comportamento da compressão de tortas de pó associado a propriedades de partículas.

Dessa forma, estudos (como alguns já mencionados neste trabalho) têm sido realizados com o intuito de gerar um maior conhecimento do comportamento de deposição das partículas que formam a torta de filtração, bem como da estrutura desta camada e de sua influência na queda de pressão no processo de filtração de gases através da estimativa ou determinação da porosidade da torta.

Schmidt (1995) e Aguiar (1995) investigaram experimentalmente a compressibilidade de tortas de filtração de gases em meios filtrantes. Ambos os autores utilizaram um processo de embutimento da torta para obtenção de imagens que forneceram a porosidade das tortas ao longo de sua espessura. Schmidt (1995) obteve curvas de queda de pressão ao longo do tempo de filtração e concluiu que o desvio da tendência linear sofrido pelas curvas pode ter sido causado pela compressão de diferentes regiões da torta. Aguiar (1995) obteve tortas de calcário dolomítico de diferentes espessuras e observou que a porosidade ao longo das tortas não era constante e, portanto, as tortas eram compressíveis.

Cheng e Tsai (1998) determinaram a porosidade usando valores de espessura da torta medida em um equipamento a laser e da massa de pó depositada no filtro por unidade de área. Os autores concluíram que a resistência específica da torta aumenta com a diminuição do tamanho de partícula ou com o aumento da velocidade superficial de filtração. Eles verificaram, também, que a torta de pó é irreversivelmente compactada durante a filtração e esta compactação aumenta com o incremento da velocidade de filtração. A velocidades mais altas, a torta é mais compactada resultando em uma menor porosidade e maior resistência específica. Ao verificar a porosidade de tortas formadas por partículas finas de calcário de formato irregular, os autores observaram que essa porosidade foi maior que a porosidade de

tortas formadas por partículas esféricas de fuligem. Averiguou-se que a razão para tal pode estar ligada ao arranjo mais aleatório das partículas irregulares.

Neiva et al. (1999) desenvolveram um modelo para cálculo da queda de pressão a uma velocidade superficial de filtração constante através da comparação de duas correlações, a equação de Kozeny-Carman e o modelo de célula de Happel (1986). Embora o objetivo da simulação tenha sido de prever a queda de pressão, os autores utilizaram os dados obtidos por Schmidt (1995) para calcular a porosidade utilizando as duas correlações mencionadas e considerando as esfericidades reais da partícula e também uma esfericidade igual à unidade (esferas perfeitas). O modelo proposto por eles concordou com as medidas experimentais ao se considerar as partículas como esferas perfeitas. Mais tarde, Neiva e Goldstein Jr. (2003) desenvolveram um procedimento para calcular o aumento da queda de pressão com o tempo num ciclo de filtração de pó considerando as propriedades da torta resultantes da compressão advinda da força de arraste acumulada devida ao fluxo do gás atuando sobre as partículas.

Silva et al. (1999) avaliaram a influência da velocidade do gás na formação de tortas de rocha fosfática e concluíram que a porosidade diminui e a resistência específica da torta aumenta com o aumento da velocidade superficial de filtração. Os autores também observaram que o tamanho médio de partícula do material da qual a torta era constituída aumentou com o aumento da velocidade de filtração. Eles concluíram que o efeito da porosidade é maior quando comparado ao efeito do diâmetro médio de partícula.

Choi et al. (2004a) investigaram a compressibilidade de tortas de fuligem de um combustor de leito fluidizado de carvão em filtro de cerâmica. A espessura das tortas foi medida através de um sistema de medida a laser. Foram obtidas tortas de partículas com diferentes diâmetros geométricos médios e fatores de forma ajustados a diferentes velocidades de filtração. Os autores concluíram que a porosidade é extremamente dependente da velocidade superficial de filtração e da carga mássica, porém é menos dependente do tamanho de partícula. A compressibilidade da torta também foi observada. Este fato ocorreu, segundo os autores, devido à compressão sofrida pelas camadas de pó mais inferiores pela força de arraste causada pelas camadas superiores.

Jeon e Jung (2004) desenvolveram um método de simulação para investigar o comportamento de compressão de tortas de pó. Os autores levaram em consideração o efeito do tamanho da partícula na compressibilidade de tortas de aerossóis monodispersos para desenvolver um método para o caso mais complexo de filtração utilizando aerossóis polidispersos. Os resultados mostraram que as forças de adesão, atrito e compressão agindo

sobre a partícula têm um papel significativo na determinação do comportamento de compressão das tortas. Da mesma forma, foi observado que partículas menores tendem a causar quedas de pressão mais altas através das tortas constituídas de aerossóis monodispersos.

Al-Otoom (2005) elaborou um modelo estatístico de previsão da eficiência de coleta, espessura da torta e porosidade da torta e da queda de pressão através da torta de filtração durante a filtração de gases. O modelo baseia-se na geração de uma distribuição aleatória de tamanhos de partículas e do local de queda da partícula. Neste estudo, o autor notou que a porosidade da torta diminui com o aumento da espessura da torta e que a queda de pressão aumenta com a diminuição do diâmetro médio de partícula.

Dueck et al. (2007) conduziram uma simulação de formação de tortas de filtração como um processo randômico. Nesta simulação a torta é construída partícula a partícula e o balanço de forças considera a força de arraste, forças adesivas e forças exercidas pelas camadas de partícula sobrepostas. Os cálculos mostraram que as porosidades média e local dependem dos parâmetros de filtração e da distribuição de tamanho dos poros. Sob condições de compressibilidade, a torta torna-se quebradiça e apresenta um gradiente de porosidade tendo valores menores na interface torta-tecido.

Park et al. (2007) estudaram a porosidade da torta de filtração utilizando análise de imagens em um sistema de micro-filtração. Segundo os autores, o acúmulo da torta aumenta a resistência ao fluxo reduzindo a permeabilidade do mesmo. A resistência da torta depende de vários fatores, dentre eles, da porosidade da torta e das propriedades físicas das partículas (tamanho e forma). Os autores utilizaram análise de imagens obtidas por microscópio de varredura a laser e determinaram que para pequenas partículas, a porosidade da torta é pouco dependente da dimensão das partículas, enquanto que para partículas maiores, a porosidade diminui com o aumento do tamanho das partículas. Foi observado, ainda, que a porosidade diminui com o aumento da queda de pressão.

Ito e Aguiar (2009) estudaram a porosidade de tortas formadas por diferentes materiais particulados utilizando o microscópio óptico para obtenção das imagens das tortas que foram analisadas num programa de análise de imagem. As autoras obtiveram o comportamento da porosidade como função da velocidade superficial de filtração. Concluiu-se que a porosidade diminui com o aumento da velocidade. A porosidade média do amido de milho foi maior que a do polvilho e do concentrado fosfático, possivelmente devido à forma das partículas, diferenças nas características físico-químicas dos materiais e distribuição

granulométrica. Baseado na relação dos dados de porosidade média e velocidade, as autoras propuseram uma correlação empírica que melhor se ajustou a esses parâmetros.

Chen e Hsiau (2009a) estudaram as propriedades de compressão de tortas de pó fino através de medidas de espessura média das tortas, eficiência de coleta e queda de pressão sob condições experimentais. Através dos resultados experimentais, foi observado que um aumento de 1 mmH₂O resultou numa diminuição de 0,001 na porosidade da torta e um aumento de 0,11% na eficiência de coleta. Segundo os autores, a porosidade da torta diminui e a resistência específica da torta aumenta com o aumento da força de compressão na torta. A torta de pó foi compactada para maiores velocidades de filtração resultando em tortas menos porosas e numa maior resistência específica da torta. Eles concluíram que a força de compressão da torta correspondente pode melhorar a eficiência de coleta.

Chen e Hsiau (2009b) desenvolveram um método experimental com o intuito de melhorar o conhecimento sobre a formação e crescimento das tortas de filtração de gases. Eles desenvolveram um sistema de medida para medir a espessura das tortas. Segundo os autores, devido à influência da força de cisalhamento excessiva, a diminuição da espessura da torta causou uma redução na resistência específica da torta e da eficiência de coleta. No entanto, a velocidades superficiais de filtração maiores, a torta foi mais compactada resultando no aumento desses parâmetros, ou seja, a espessura e a velocidade superficial de filtração influenciaram significativamente o desempenho da filtração pela torta.

Azevedo (2009) estudou a porosidade de diversas partículas orgânicas através do método indireto utilizando as equações de Ergun (Equação 2.11), MacDonald (Equações 2.14 e 2.15) e Endo et al. (Equação 2.16). A autora concluiu que as equações utilizadas apresentaram o mesmo comportamento, sendo que os valores obtidos pela Equação de Ergun foram menores que os obtidos pelas outras equações, enquanto que a Equação de Endo et al. apresentou os maiores valores de porosidade (exceto para o polvilho doce). Ela observou, ainda, que os materiais apresentaram porosidades diferentes quando meios filtrantes de tecidos diferentes foram utilizados, concluindo que a porosidade depende não só da interação partícula-partícula, mas também das propriedades do tecido, da interação partícula-tecido e das características físicas da partícula (como seu formato). Por fim, averiguou-se que as partículas menos esféricas (amido de milho) apresentaram maiores valores de porosidade e as partículas achatadas (farinha de trigo) formaram tortas com os menores valores de porosidade dentre os materiais estudados.

De acordo com o que foi apresentado, a compressibilidade de tortas de filtração de gases é um parâmetro muito importante a ser avaliado, uma vez que afeta direta e principalmente, a resistência específica da torta, a queda de pressão no filtro e a eficiência de coleta de partículas. Entretanto, a tecnologia de filtração por tecido ainda não é totalmente compreendida devido a dificuldades em analisar o comportamento de compressão das tortas associado a propriedades da partícula. Assim, torna-se imprescindível o estudo do comportamento de compressão do maior número possível de materiais particulados de diferentes características na formação de tortas de filtração sobre o maior número possível de meios filtrantes de tecido.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

A seguir são apresentados os materiais utilizados nos ensaios de filtração realizados neste trabalho. Estes materiais foram escolhidos com o intuito de se produzir tortas de filtração de diferentes espessuras obtidas a quedas de pressão máximas distintas através dos métodos direto e indireto para verificação da compressibilidade das mesmas.

3.1.1. Material pulverulento

As densidades médias dos materiais pulverulentos (ρ_p) utilizados neste trabalho (concentrado fosfático e talco) foram determinadas através de triplicatas utilizando-se um picnômetro a hélio (AccuPyc 1330 da MICROMERITICS).

O diâmetro médio de Stokes das partículas (d_{St}) foi determinado através de triplicatas utilizando-se o equipamento SEDIGRAPH (modelo 5000d), um analisador de tamanho de partícula da MICROMERITICS.

A circularidade das partículas foi determinada com auxílio do programa Image Pro Plus e da Equação 2.19.

A Tabela 3.1 apresenta os valores de densidade, diâmetro médio e circularidade das partículas. A Figura 3.1, mostra as distribuições granulométricas dos dois materiais.

Tabela 3.1 – Valores de densidade, diâmetro médio de Stokes e circularidade para os materiais estudados.

Material	ρ_p (g/cm ³)	d_{St} (µm)	Circularidade
Concentrado fosfático	3,20	5,60	0,20
Talco	3,09	2,50	0,60

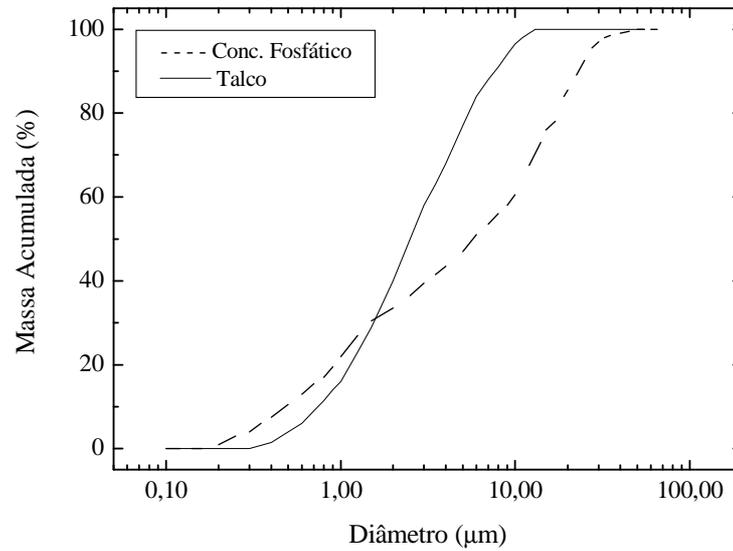


Figura 3.1 – Distribuição granulométrica do concentrado fosfático e do talco obtida através dos dados do Sedigraph.

3.1.2. Tecido

Dois tipos de tecido foram utilizados como meio filtrante: um feltro de poliéster e um feltro de acrílico. Os feltros consistiam de uma tela plana com área livre de filtração de 249 cm².

Ambos foram fornecidos pela empresa Gino Cacciari (Indústria e Comércio de Filtros Tecnológicos Ltda.) e são os mesmos empregados na confecção de filtros de manga industriais.

As características dos meios filtrantes empregados fornecidas pelo fabricante encontram-se na Tabela 3.2 juntamente com outras propriedades obtidas por Rodrigues (2004) através de microscopia e análise de imagens. A Figura 3.2 mostra microfotografias das superfícies dos tecidos.

Tabela 3.2 – Características dos meios filtrantes.

Meio Filtrante	Contextura*	Gramatura (g/m ²)*	Tratamento*	Porosidade Superficial**	Permeabilidade (m ²)**
Poliéster	Feltro Agulhado	600	Calandragem/chamuscagem	0,81	5,9 x 10 ⁻⁸
Acrílico	Feltro Agulhado	550	Calandragem/chamuscagem	0,77	5,5 x 10 ⁻⁸

*Dados fornecidos pelo fabricante. ** Dados obtidos por Rodrigues (2004).

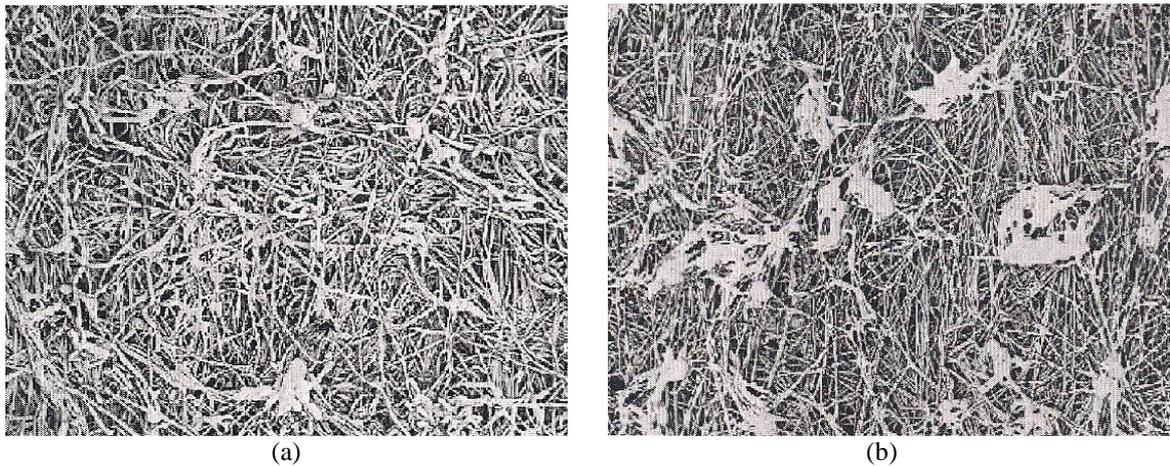


Figura 3.2 – Microfotografias dos tecidos obtidas através de um MEV com ampliação de 50 vezes: (a) acrílico e (b) poliéster. (Fonte: TOGNETTI, 2007).

3.2. Unidade Experimental

A Figura 3.3 ilustra a unidade experimental de filtração com os principais componentes que se encontra no Departamento de Engenharia Química da UFSCar. A unidade é composta basicamente por uma caixa de alimentação de material particulado, uma entrada de ar comprimido, cilindros contendo sílica para reduzir e manter baixa a umidade relativa do ar dentro da caixa de alimentação, um soprador, uma caixa de filtração e limpeza, sensores diferenciais de pressão e sistema de aquisição de dados e controle do processo de filtração. Os detalhes dos principais componentes do sistema são apresentados a seguir.

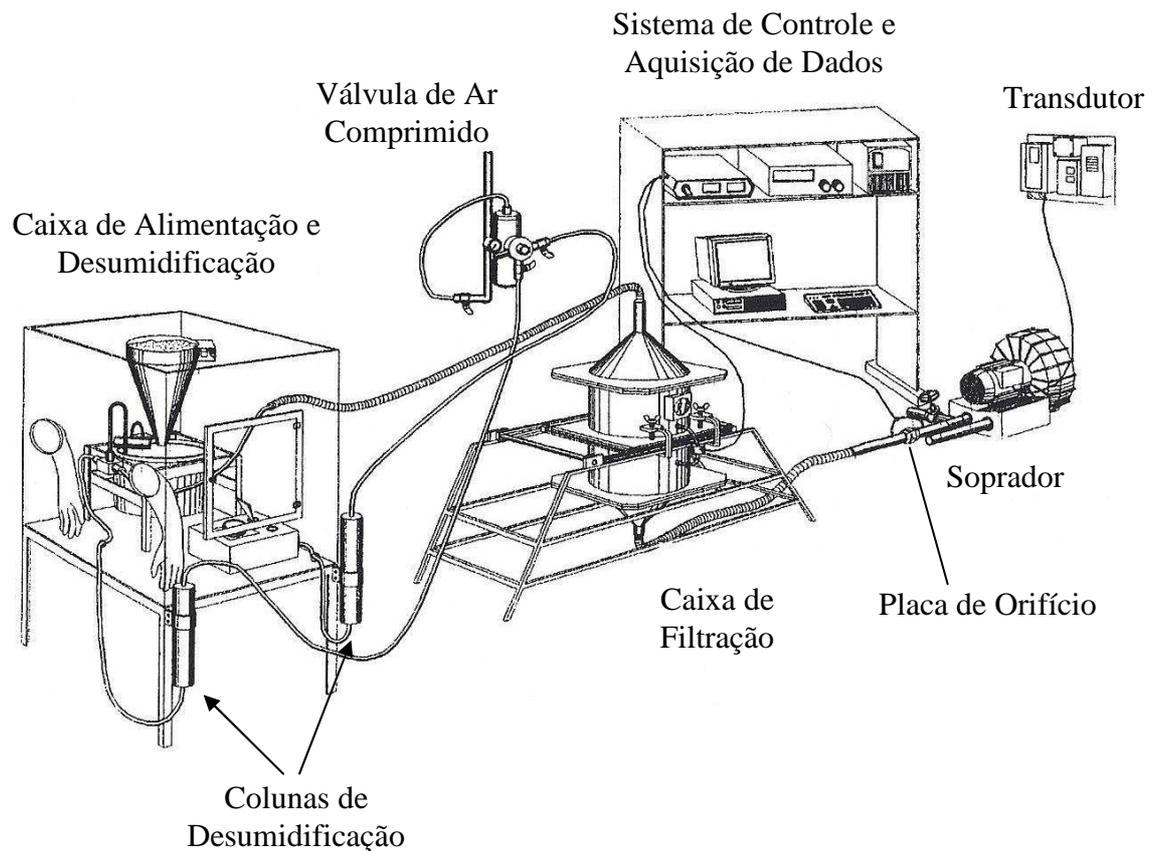


Figura 3.3: Esquema geral da unidade experimental de filtração.

3.2.1. Caixa de filtração

O processo de filtração ocorre, de fato, na caixa de filtração de PVC, ilustrada na Figura 3.4. Composta essencialmente por um suporte para o meio filtrante e de um sensor diferencial de pressão para medir a queda de pressão no filtro, a caixa de filtração pode ser utilizada na posição vertical (filtração), onde o fluxo de ar contendo partículas se dá de cima para baixo e horizontal, onde o fluxo de ar ocorre da direita para a esquerda (limpeza do meio filtrante).

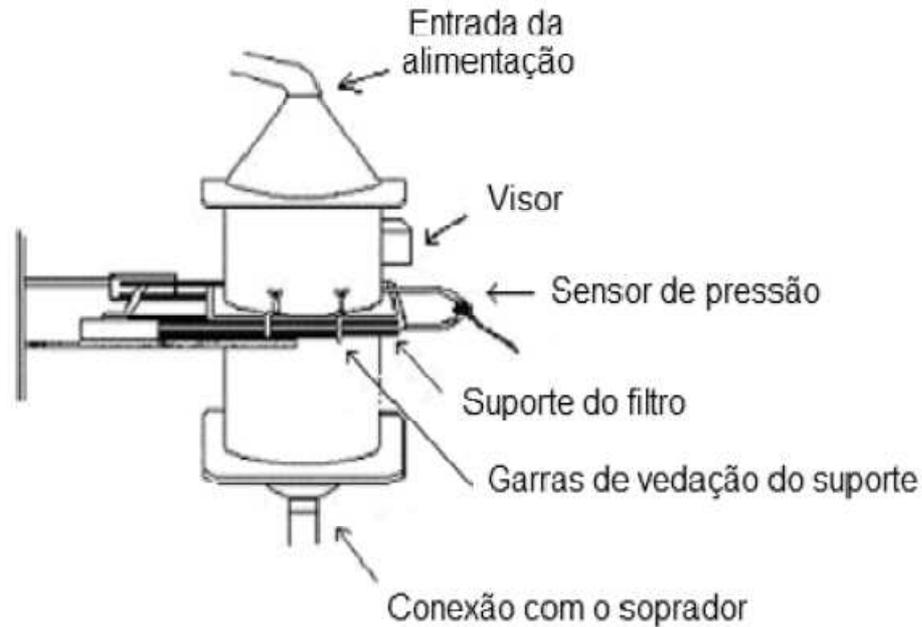


Figura 3.4: Esquema da caixa de filtração.

3.2.2. Sistema de alimentação do material particulado

A Figura 3.5 mostra um esquema do sistema de alimentação de material particulado que é do tipo prato giratório.

Ele consiste de um prato com sulco circular e de um cone de alimentação localizado acima do prato, onde o pó é armazenado. O sulco é preenchido pelo pó à medida que o prato gira ao redor do próprio eixo sendo que o nível do pó é nivelado por um anel localizado na base do cone para garantir que a mesma quantidade de pó seja a mesma em qualquer ponto do sulco. O alimentador consiste, ainda, de um Venturi que faz a sucção do material pulverulento do prato e lança-o na corrente gasosa. Este sistema é vedado dentro de uma caixa de acrílico para que seja possível o controle da umidade relativa do ar dentro da mesma.

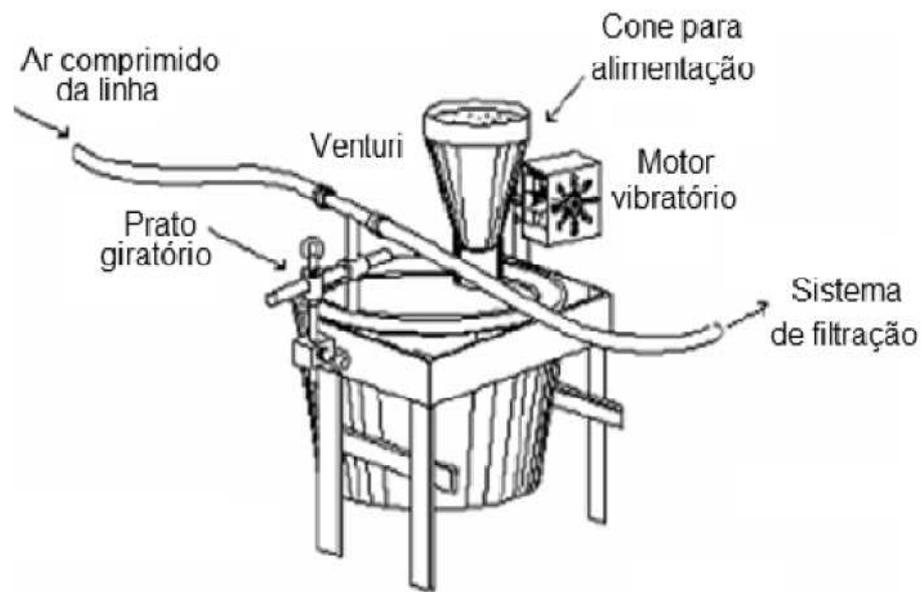


Figura 3.5: Esquema do alimentador de pó.

3.2.2.1. Calibração do gerador de pó

O gerador foi calibrado para cada material particulado utilizando-se sacos de papéis descartáveis do tipo usado em aspiradores de pó e um cronômetro. A vazão mássica para cada pó foi determinada calculando-se o tempo gasto para o prato giratório dar uma volta completa para determinada velocidade de rotação dada pela porcentagem da velocidade máxima de rotação. Foram medidos os tempos e massas obtidas para velocidades de rotação de 5, 10, 15, 20 e 30% da rotação máxima em triplicatas.

O tubo que sai do Venturi foi colocado dentro do saco de papel previamente pesado e a massa sugada para uma volta completa do prato foi medida.

Com os dados de massa e tempo para cada velocidade de rotação (%) pôde-se relacionar a mesma com a vazão mássica (g/s).

Como exemplo, a Tabela 3.3 apresenta os dados obtidos para uma (de três) das análises feitas para a calibração com o talco.

Tabela 3.3: Exemplo dos dados obtidos na calibração do gerador de pó para o talco.

Rotação (%)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Variação de Massa (g)	Tempo (s)	Vazão Mássica (g/s)
5	10,1412	13,3631	3,2219	280	0,0115
10	6,0132	8,7543	2,7411	54	0,0508
15	6,0166	8,4712	2,45	26	0,0944
20	5,9483	8,4172	2,47	17	0,1452
30	5,9712	8,3023	2,33	17	0,1371

A Tabela 3.4 traz os valores médios de vazão mássica para cada porcentagem de rotação do prato dos experimentos feitos em triplicata para o talco e, também, os respectivos erros padrão médios.

Tabela 3.4: Vazão mássica média de pó (talco) para cada rotação do prato e os respectivos erros padrão médios das triplicatas.

Rotação (%)	Vazão Mássica Média (g/s)	Erro Padrão Médio
5	0,0124	$\pm 0,00173$
10	0,0519	$\pm 0,00134$
15	0,1097	$\pm 0,02192$
20	0,1570	$\pm 0,01662$
30	0,1790	$\pm 0,05919$

A rotação escolhida para a realização dos ensaios de filtração foi a de 10% por apresentar as menores variações nos valores de vazão mássica nas repetições dos testes de calibração, como pode ser comprovado através do erro padrão médio para esta medida.

3.2.2.2. Caixa de desumidificação e desumidificadores

Nos ensaios de filtração, a umidade relativa do ar deve ser criteriosamente controlada para evitar interferências no processo. Assim, verificou-se se a caixa acrílica contendo o sistema de alimentação do pó estava totalmente lacrada, fazendo-se os reparos necessários, como troca da borracha de vedação da porta da caixa que se encontrava gasta pelo longo tempo de uso.

O ar de sucção era desumidificado pela passagem através de duas colunas contendo sílica gel. A sílica era trocada semanalmente ou quinzenalmente, dependendo das condições climáticas e da periodicidade de utilização da unidade experimental.

O pó era mantido em estufa a aproximadamente 70°C até o momento da filtração, quando era retirado da estufa e colocado imediatamente dentro da caixa acrílica evitando-se ao máximo o contato com o meio externo.

Durante os ensaios, a umidade relativa do ar dentro da caixa de alimentação, medida com um termo-higrômetro digital, foi mantida em torno de 18% nos dias mais úmidos e em torno de 15% nos dias menos úmidos, enquanto a umidade relativa externa era de aproximadamente 67% e 47%, respectivamente.

3.2.2.3. Sistema de aquisição de dados e controle

O equipamento de filtração consta de um sistema de aquisição de dados composto por dois sensores de pressão diferencial, uma placa de aquisição de dados, um inversor de frequência e um computador. Um dos sensores está posicionado na placa de orifício e mede a queda de pressão na placa para que o cálculo da vazão de ar que passa por ela possa ser calculado. A leitura desse dado é feita pela placa de aquisição e os dados são calculados através de um software elaborado em Visual Basic 3.0. Esse dado é utilizado para controlar o soprador para que a vazão de ar seja sempre constante. O outro sensor está posicionado na caixa de filtração. Os dados obtidos por esse sensor diferencial são armazenados e plotados em um gráfico em função do tempo.

3.3. Metodologia experimental

3.3.1. Ensaio de filtração

Durante a filtração, o gerador de pó dispersava o material pulverulento no ar sugado a uma vazão constante (10 % da rotação do prato).

O ar “sujo” era succionado para o interior da caixa de filtração e passava pelo meio filtrante (tecido), posicionado horizontal e perpendicularmente ao escoamento do gás (ar). Dessa forma, as partículas eram depositadas nas fibras e superfície do tecido formando a torta de filtração de gases. O ar “limpo” que saía do filtro tinha sua vazão medida pela placa de orifício acoplada ao manômetro digital.

A velocidade superficial de filtração foi mantida constante (10,0 cm/s) durante os ensaios de filtração da rocha fosfática até que a queda de pressão atingisse valores predeterminados (100, 300, 600, 900 e 1200 mmH₂O ou 981, 2942, 5884, 8826 e 11768 N/m² – em valores aproximados), que correspondem a cinco espessuras diferentes tendo como meios filtrantes o feltro de poliéster e de acrílico. No caso do talco, os ensaios foram realizados também a 10,0 cm/s, mas até que a queda de pressão atingisse 300, 600, 900 e 1200 mmH₂O (aproximadamente 2942, 5884, 8826 e 11768 N/m²).

Ensaio variando a velocidade superficial de filtração também foram realizados para o talco. Quatro velocidades foram investigadas (7,5 cm/s, 10,0 cm/s, 12,5 cm/s e 15,0 cm/s) sendo mantidas constantes durante toda a formação da torta até que a queda de pressão atingisse 900 mmH₂O (aproximadamente 8826 N/m²).

O ar filtrado passava pelo soprador e era descarregado na atmosfera.

3.3.2. Determinação experimental da porosidade da torta de pó

O método para determinar o valor da porosidade da torta consistiu na preparação da mesma para ser examinada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) de acordo com o método descrito e utilizado por Aguiar (1995).

3.3.2.1. Pré-endurecimento da torta

A Figura 3.6 mostra o equipamento utilizado no pré-endurecimento da torta. Ele consiste de duas seções cilíndricas de ferro. No interior dessa tampa há uma tela de arame para sustentação do meio filtrante contendo a torta. As seções cilíndricas possuem uma borracha macia para garantir maior vedação ao sistema. A parte externa dos cilindros contém tubos de 1 cm de diâmetro na parte superior e de 2 cm de diâmetro na parte inferior.

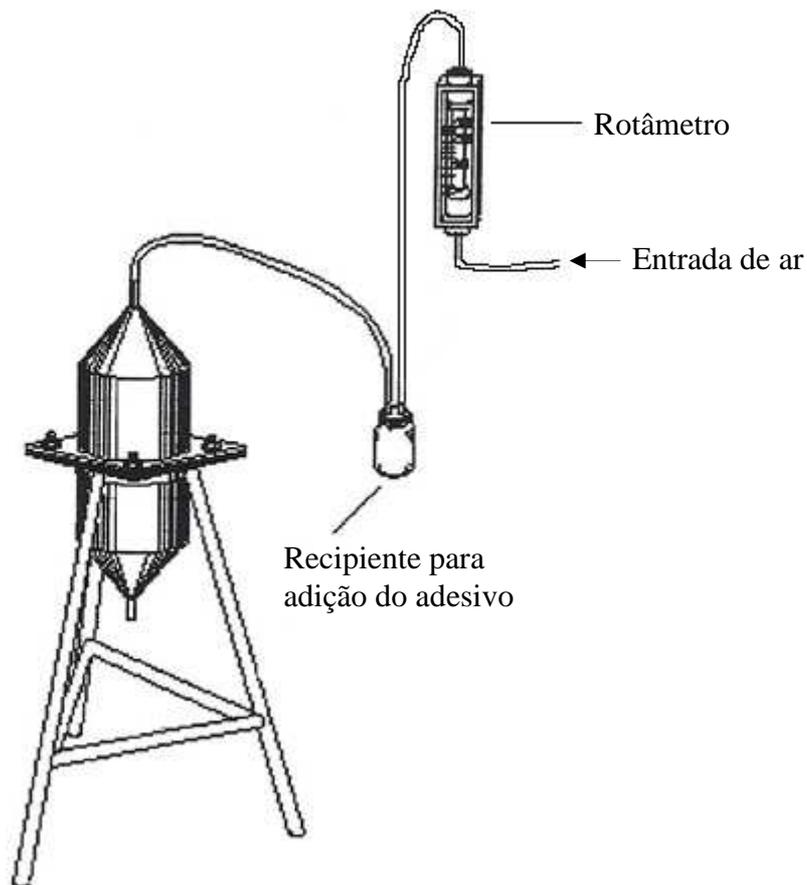


Figura 3.6 – Esquema do equipamento de pré-endurecimento da torta de filtração. (Modificada de ITO, 2002).

Após a filtração, o meio filtrante contendo a torta era retirado da caixa de filtração, pesado e, em seguida, fixado na caixa de pré-endurecimento. O método de pré-endurecimento consistia na passagem de vapor de um adesivo instantâneo (LOCTITE 416), arrastado pelo fluxo de ar úmido através do meio filtrante contendo a torta a uma velocidade

baixa para evitar qualquer alteração da estrutura da torta. Esse procedimento conferia certa estabilidade estrutural à camada de pó para que ela pudesse receber o tratamento de embutimento e durava em torno de 48 horas, dependendo da espessura da torta. A Figura 3.7 mostra uma torta de rocha sobre um feltro de poliéster após o pré-endurecimento.



Figura 3.7 – Torta de filtração de rocha fosfática em feltro de poliéster após o pré-endurecimento.

3.3.2.2. Embutimento

Depois do pré-endurecimento, a torta era transportada para um recipiente de pirex contendo uma esponja previamente encharcada com uma resina embutidora (LOCTITE PMS-10) que era absorvida pela torta. Em seguida, a torta era colocada para curar em uma estufa a 70° C, por aproximadamente 6 dias para curar a resina.

3.3.2.3. Seccionamento

A torta ficava rígida após a cura da resina e era, então, seccionada em pedaços de aproximadamente 1 cm^2 de área utilizando-se uma serra de fita.

Esses pedaços foram embutidos em moldes cilíndricos de PVC utilizando-se uma mistura de resina (Fiberglass-10249) e catalisador visando dar resistência mecânica à amostra de modo a atenuar a desestruturação nas etapas seguintes. Em seguida, deixava-se a resina curar por três dias.

3.3.2.4. Esmerilamento

O esmerilamento consistia em retirar os arranhões causados pelo seccionamento da torta, além de realizar o desbaste da amostra.

As amostras foram desbastadas em uma lixeira e depois lixadas a úmido em lixas de carbeto de silício, na sequência de 400, 600, 1200 e 2000 mesh, mantendo-se a operação em aproximadamente 8 minutos em cada lixa. Entre cada lixa a amostra era lavada com água e álcool.

3.3.2.5. Polimento

Após o esmerilamento as amostras eram polidas utilizando-se uma politriz em baixa rotação. O tecido utilizado na politriz foi um veludo macio impregnado com uma suspensão de alumina de $1 \mu\text{m}$ e $0,3 \mu\text{m}$, nessa sequência. O polimento era realizado até que os riscos deixados pela última lixa (2000 mesh) fossem retirados. Esses riscos podiam ser visualizados em um microscópio óptico.

3.3.2.6. Obtenção das microfotografias

As amostras polidas foram levadas ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) do DEMa – UFSCar, onde receberam tratamento para visualização no MEV. O equipamento usado para obtenção das imagens foi um MEV-FEG da Philips (XL 30) do LCE.

Na Figura 3.8, pode-se visualizar duas tortas embutidas e já polidas (amostras da esquerda) e duas tortas que receberam o tratamento com ouro (amostras da direita).



Figura 3.8 – Foto de duas tortas embutidas e polidas (esquerda) e de duas tortas após tratamento para visualização no MEV (direita).

Para cada amostra foram obtidas microfotografias da seção transversal da torta com ampliação de 1000. Foram obtidas microfotografias ao longo da torta desde a interface torta-ar até a interface torta-tecido e, para cada posição foram obtidas duas ou três microfotos, dependendo da qualidade da imagem. Exemplos destas fotos podem ser observados na Figura 3.9 e na Figura 3.10. Ao todo foram obtidas e analisadas aproximadamente 500 microfotografias.

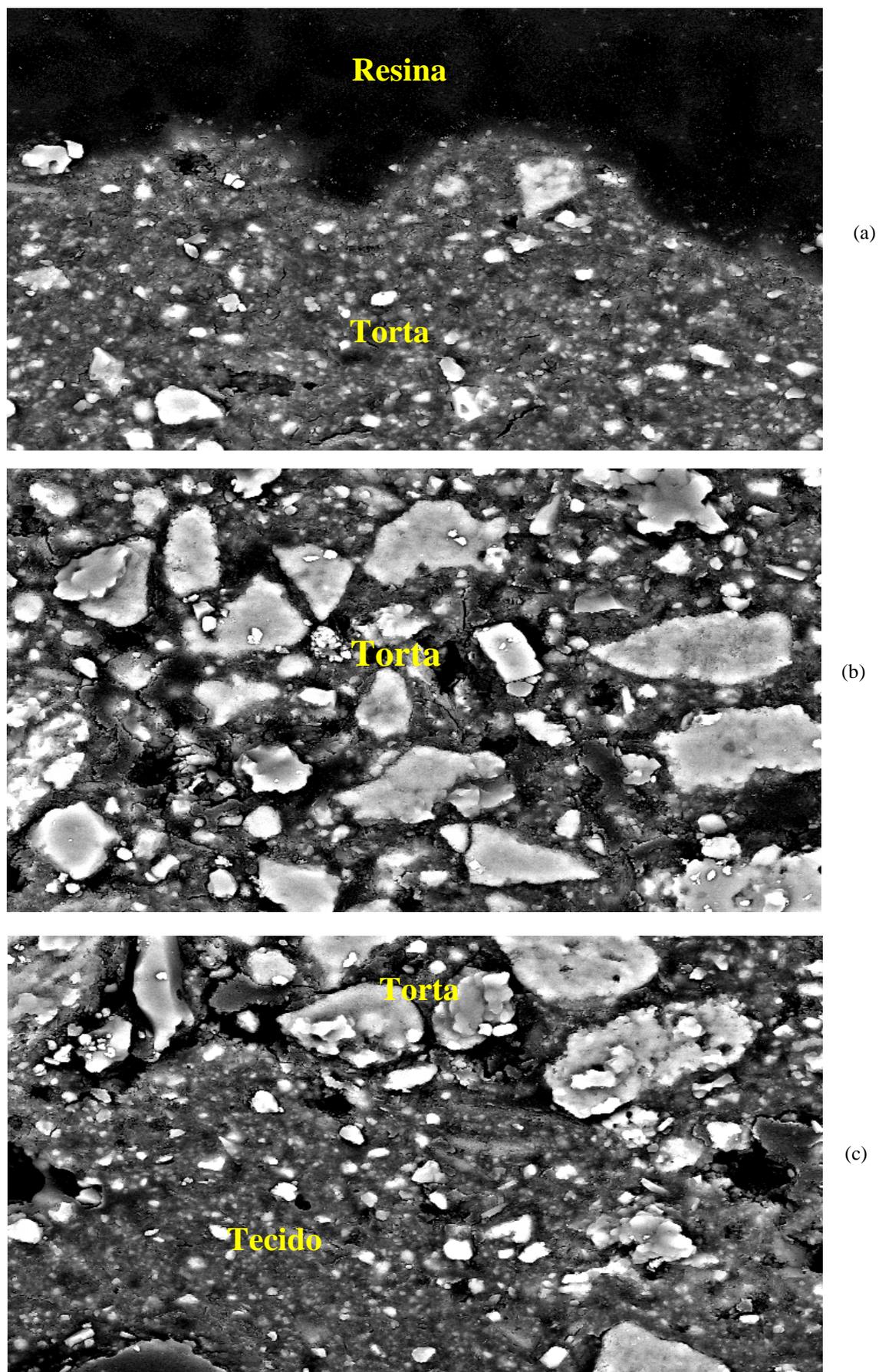


Figura 3.9 – Microfotografias de diferentes posições de uma amostra de torta de rocha fosfática obtidas no MEV com 1000X de aumento: (a) interface torta-ar, (b) centro e (c) interface torta-tecido.

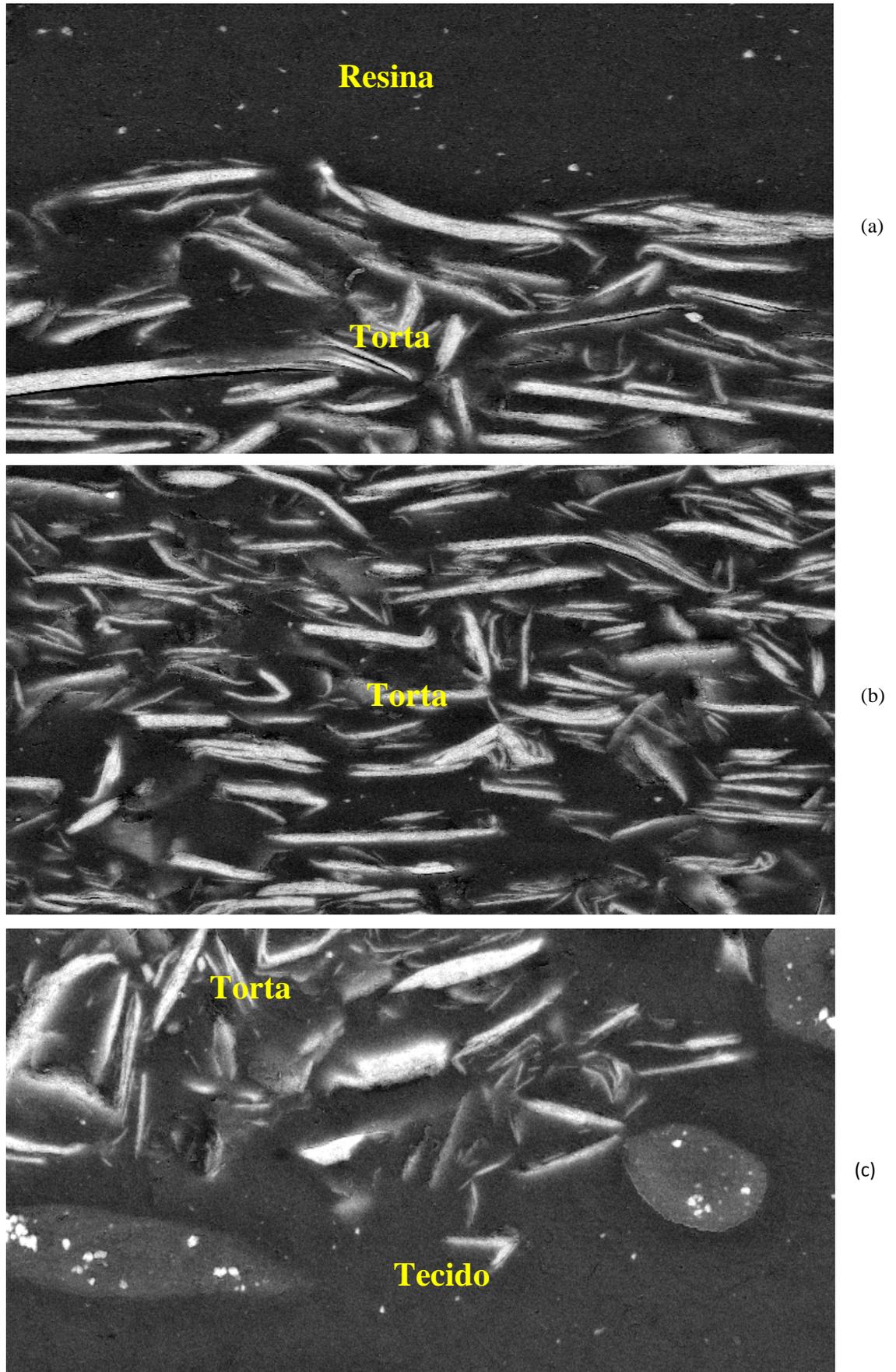
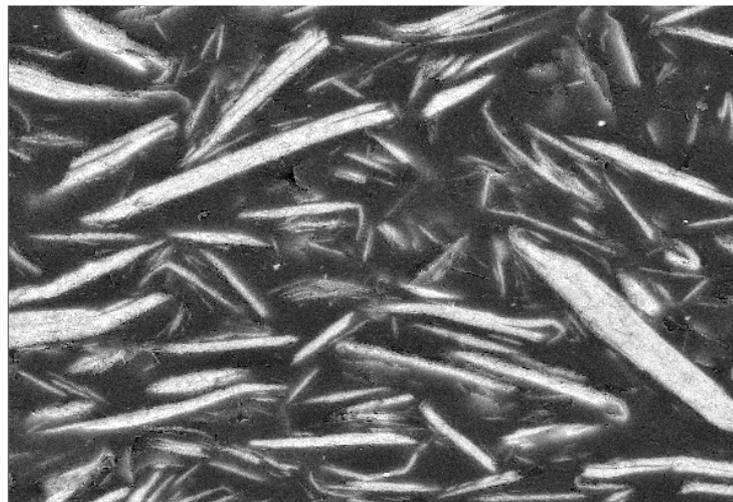


Figura 3.10 – Microfotografias de diferentes posições de uma amostra de torta de talco obtidas no MEV com 1000X de aumento: (a) interface torta-ar, (b) centro e (c) interface torta-tecido.

3.3.2.7. Análise das imagens

As imagens geradas pelo MEV foram analisadas em um programa de análise de imagem chamado Image Pro Plus. Este programa possibilita a binarização de imagens que transforma a imagem real em apenas dois níveis de cores (pontos claros e escuros). As Figuras 3.11 e 3.12 mostram (a) uma foto antes da binarização e (b) a mesma foto depois do tratamento de imagem de amostras de torta de talco e de rocha fosfática, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 3.11 – Microfotografia de uma torta de filtração de talco: (a) obtida diretamente do MEV e (b) após a binarização. Aumento de 1000X.

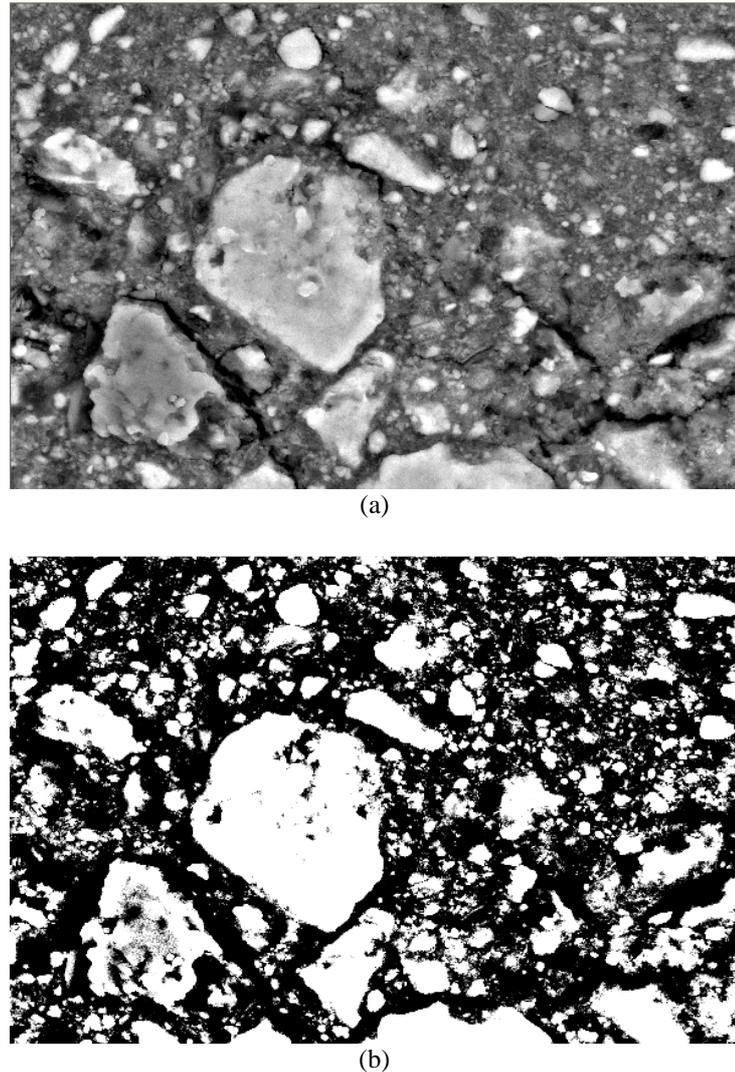


Figura 3.12 – Microfotografia de uma torta de filtração de rocha fosfática: (a) obtida diretamente do MEV e (b) após a binarização. Aumento de 1000X.

3.3.2.8. Obtenção da porosidade

A porosidade volumétrica de um sistema poroso é definida como a razão de volume de vazios pelo volume total. Assumindo-se que o meio poroso é homogêneo, a quantificação desse parâmetro pode ser usada para caracterizar a estrutura do sistema. Portanto, por analogia com a porosidade volumétrica determinou-se, a partir de áreas planas, a porosidade superficial, definida como a razão de área vazia pela área total. Dessa forma, a porosidade pode ser determinada utilizando-se as imagens obtidas através da porcentagem de pontos escuros (espaço poroso) pelo número total de pontos escuros e claros (poros e partículas).

O programa Image Pro Plus, após a binarização da imagem, faz uma contagem das partículas através da coloração dos pontos claros e fornece a área total colorida. No programa, faz-se a medida da área total da imagem e calcula-se a área de pontos escuros (área vazia) através da diferença entre as áreas total e vazia. Assim, os valores de porosidade podem ser calculados através da razão da área vazia (área de pontos escuros) pela área total (área de pontos escuros mais área de pontos claros).

A Figura 3.13 mostra as imagens das Figuras 3.11 (b) e 3.12 (b) após a coloração pelo programa. Observa-se na Figura 3.13 (b) a presença de pequenos pontos brancos. Estes pontos, por seu formato e tamanho, são tomados como partículas de alumina, material utilizado no polimento das amostras e, portanto, não são contados como sendo parte da torta.

O valor obtido da porosidade depende do operador do programa analisador de imagem, pois é ele quem define qual a binarização (contraste) adequada para fornecer a porcentagem de pontos escuros, ou seja, a porosidade.

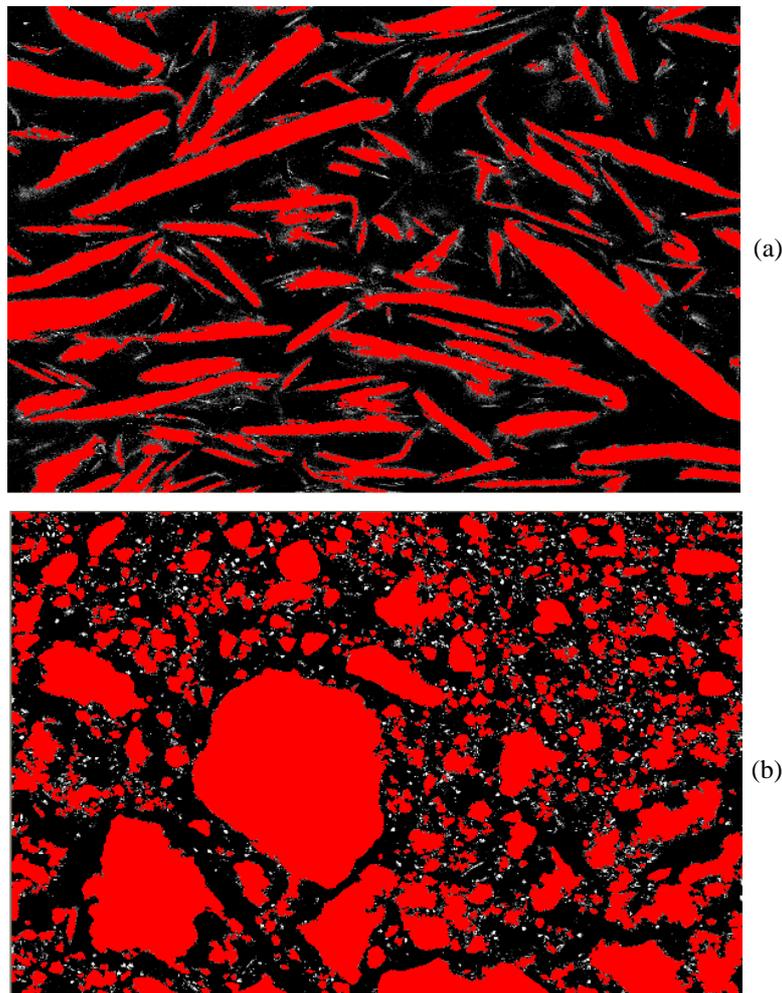


Figura 3.13 – (a) Imagem da Figura 3.11 (b) e da Figura 3.12 (b), após coloração pelo programa Image Pro Plus.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Filtração

4.1.1. Rocha fosfática

Cinco ensaios de filtração foram realizados à velocidade superficial de filtração constante de 10,0 cm/s tendo como meio filtrante um feltro de poliéster e quatro ensaios tendo como meio filtrante um feltro de acrílico, ambos a uma vazão constante de alimentação do pó.

A Figura 4.1 mostra o comportamento das curvas de filtração para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de poliéster e a Figura 4.2 tendo como meio filtrante o feltro de acrílico. As curvas apresentam comportamento típico de curvas de filtração.

No entanto, ao analisar estas duas Figuras, percebeu-se que a carga mássica depositada nos meios filtrantes de poliéster na formação das duas tortas mais espessas foi muito maior que a carga mássica depositada nos meios de acrílico para atingir as mesmas quedas de pressão máximas e para as mesmas condições operacionais. Como as permeabilidades dos tecidos são muito próximas (veja Tabela 3.2), não se esperavam resultados tão díspares.

Assim, concluiu-se que algum tipo de erro ocorreu durante o processo de filtração para as duas últimas quedas de pressão máximas. Os ensaios foram repetidos para as mesmas condições com o intuito de ratificar a mínima influência dos tecidos nos resultados apresentados na Figura 4.1. Estes resultados encontram-se nas Figuras 4.3 e 4.4. Os gráficos foram plotados com domínio negativo apenas para melhor visualização dos pontos. Nota-se que os valores plotados começam onde a queda de pressão e a massa de pó depositadas tem valor igual a zero o que representa o início da filtração (tempo igual a zero).

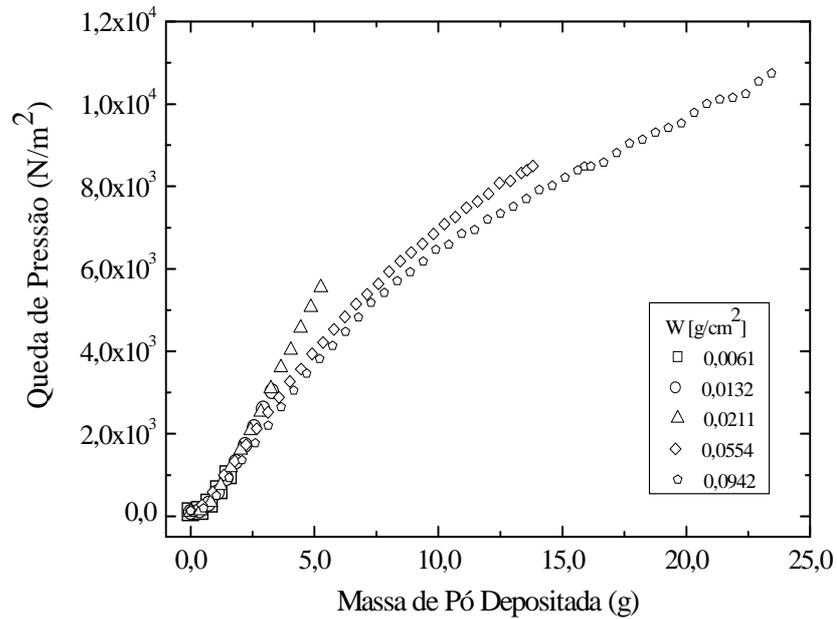


Figura 4.1 - Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para cinco quedas de pressão máximas diferentes tendo como meio filtrante um feltro de poliéster.

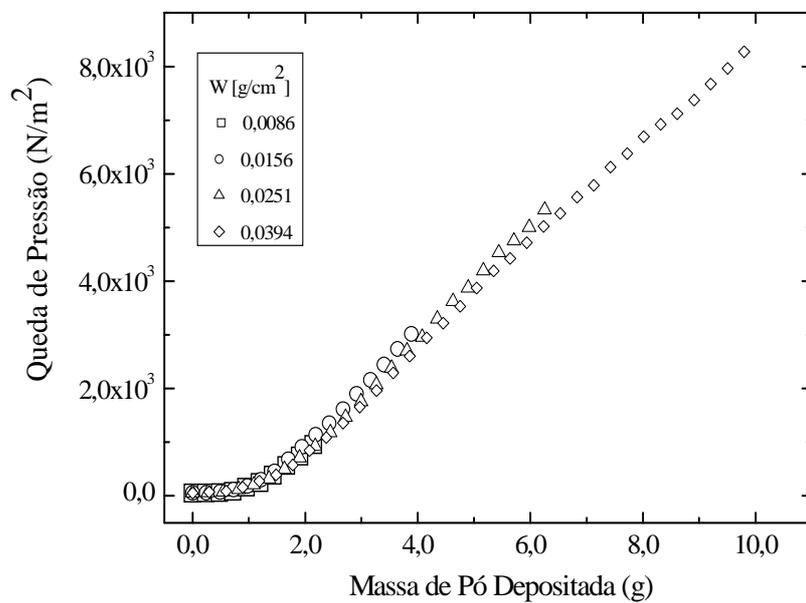


Figura 4.2 - Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para quatro quedas de pressão máximas tendo como meio filtrante um feltro de acrílico.

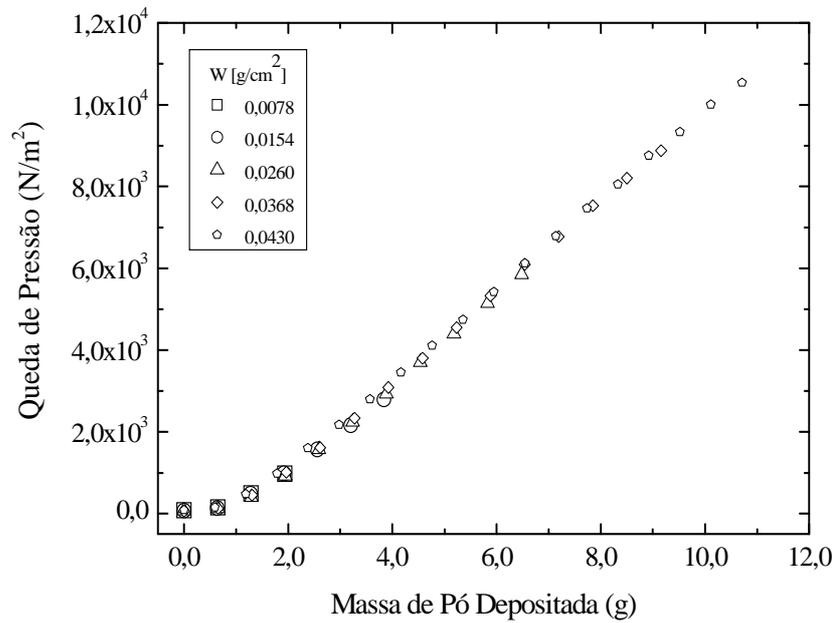


Figura 4.3 – Repetição do ensaio de queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para cinco quedas de pressão máximas diferentes tendo como meio filtrante um feltro de poliéster.

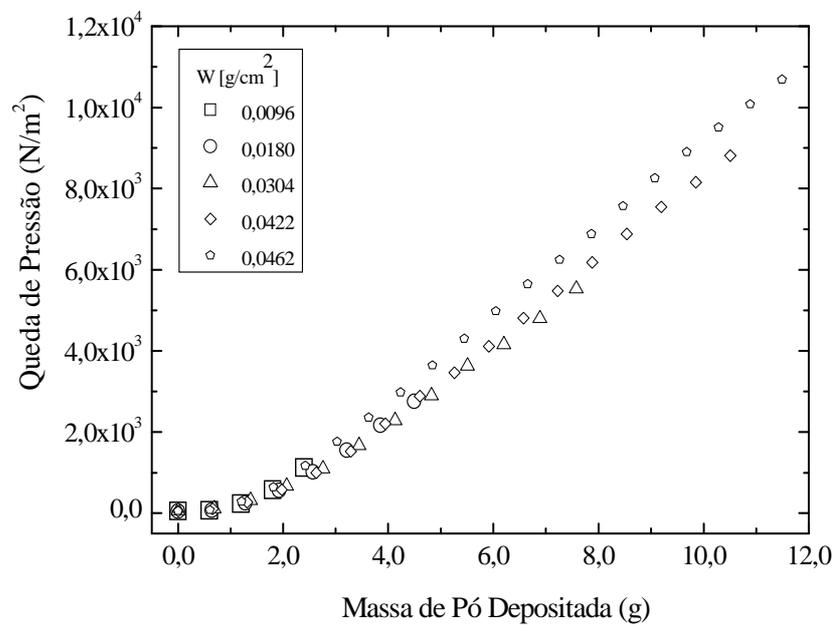


Figura 4.4 - Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) para a rocha fosfática para cinco quedas de pressão máximas tendo como meio filtrante um feltro de acrílico.

As Figuras 4.3 e 4.4 corroboram com a suspeita de que algum tipo de erro tenha acontecido nos primeiros ensaios tendo como meio filtrante um feltro de poliéster. As repetições das filtrações representadas pelas Figuras 4.3 e 4.4, mostram que, mesmo que os tecidos tenham sofrido algum tipo de deformação durante a filtração, os valores de queda de pressão para ambos não diferiram muito, uma vez que nas duas situações as curvas foram semelhantes com cargas mássicas aproximadas.

Os dados de filtração que geraram as Figuras 4.1 a 4.4 encontram-se no Apêndice A (Tabelas A1 a A8).

4.1.1.1. Comportamento de compressibilidade da torta de filtração

Na Figura 4.1, pode ser observado que, no início da filtração, a queda de pressão possui um comportamento não linear indicando a fase em que as partículas depositam-se nas fibras do tecido formando a base da estrutura da torta a ser formada. Após esta etapa, tem-se a formação de uma camada fina na superfície do meio filtrante, onde as partículas passam a se depositar. Nota-se, ainda, que depois de formadas as primeiras camadas de pó sobre o feltro de poliéster (até um valor de queda de pressão de aproximadamente 4000 N/m^2), as curvas apresentaram uma tendência linear e em seguida sofreram um desvio.

Segundo Ito (2002), o desvio nas curvas pode ter ocorrido devido à alta queda de pressão que pode ter influenciado na estrutura do meio filtrante causando uma deformação do tecido. Dennis e Klemm (1982) sugerem que este fenômeno ocorre por causa do colapso dos poros (quebra da estrutura da torta de filtração) o que poderia levar a uma redução na queda de pressão e um aumento da penetração do pó. Outros fatores, como a compressibilidade da torta (Aguiar e Coury, 1996) ou a flexibilidade do meio filtrante podem explicar tal acontecimento.

Choi et al. (2004a) explicam que, à medida que a carga mássica aumenta, as camadas mais inferiores (mais próximas ao tecido) são comprimidas pela força de arraste causada pela queda de pressão através das camadas superiores. Dessa forma, a porosidade e a espessura das camadas previamente formadas são reduzidas com o aumento da carga mássica.

No entanto, a taxa de aumento da espessura da torta torna-se constante depois de certa carga mássica, pois a camada de pó sob certa espessura torna-se incompressível. Portanto, de acordo com os autores, o desvio na curva de filtração mostra o fenômeno de compressão da torta de filtração. A Figura 4.5, que retoma a Figura 2.3, mostra um esquema de como a compressão da torta aparece para uma curva de espessura por carga mássica por área proposto pelos autores.

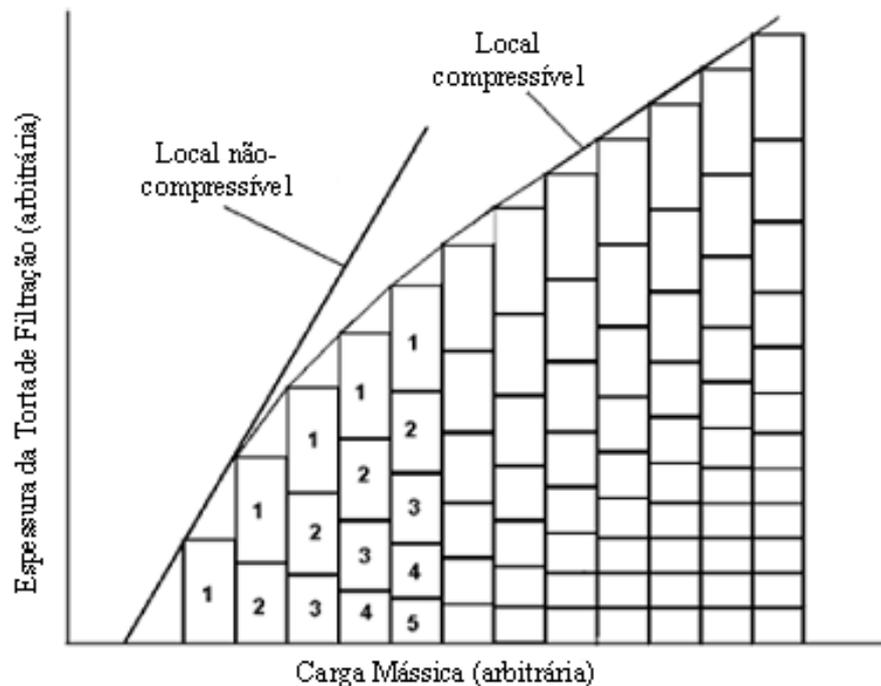


Figura 4.5 – Esquema para explicar a redução da espessura da torta pelo efeito da compressão (Adaptado de CHOI et al., 2004a).

4.1.2. Silicato de magnésio (talco químico)

A Figura 4.6 mostra as curvas de filtração obtidas para o talco tendo como meio filtrante apenas o feltro de poliéster, à velocidade superficial de filtração constante de 10 cm/s e vazão de alimentação de pó constante. Observando-se especialmente a curva de maior massa por unidade de área, percebe-se que, após a etapa de formação da torta, as curvas plotadas apresentam um comportamento praticamente linear até certo ponto, onde este comportamento começa a se desviar. Como previamente mencionado no item 4.1.1.1, isso

ocorre devido à compressão sofrida pelas camadas de pó mais inferiores pela força de arraste causada pela queda de pressão através das camadas mais superiores. Uma vez que as camadas de pó sob certa espessura tornam-se incompressíveis, a taxa de aumento da espessura da torta torna-se constante depois de certa carga mássica (Choi et al., 2004a).

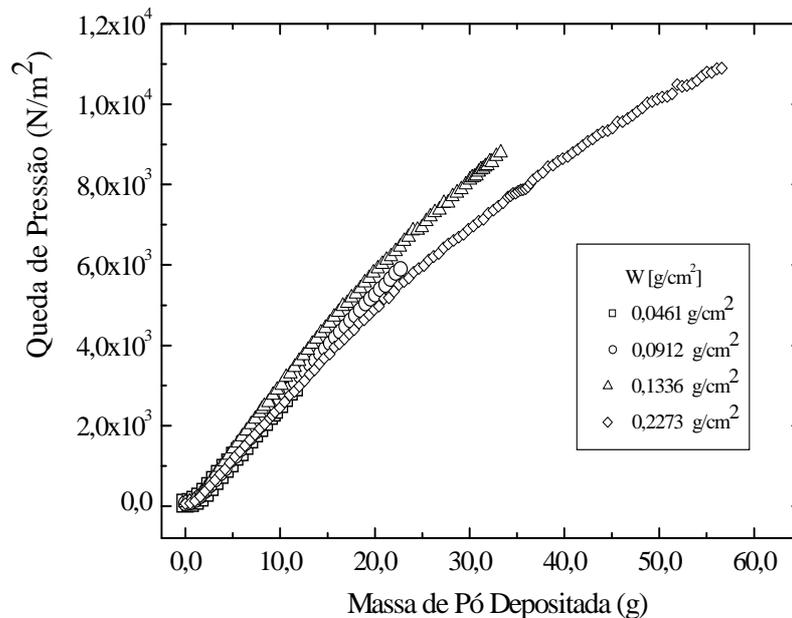


Figura 4.6 - Queda de pressão em função da massa de pó depositada no meio filtrante durante a filtração para quatro quedas de pressão máximas diferentes para o talco, com velocidade superficial de filtração constante (10,0 cm/s) tendo como meio filtrante um feltro de poliéster.

Na Figura 4.7 apresentam-se as curvas de filtração de queda de pressão para o talco em função da massa de pó depositada no meio filtrante obtidas a diferentes velocidades superficiais de filtração. Cada ensaio foi realizado até que uma queda de pressão máxima de aproximadamente 8826 N/m^2 fosse atingida. Por esta Figura, observa-se que a velocidades mais altas, a queda de pressão aumenta mais rapidamente, como esperado. Este comportamento pode ser previsto pelas equações que relacionam a queda de pressão com a velocidade superficial de filtração descritas previamente no item 2.2.2 e 2.2.4. Isto pode ser fisicamente explicado pelo fato de que, a maiores velocidades, há uma maior penetração do pó no tecido causando um “entupimento” mais rápido dos poros do mesmo, fazendo com que a queda de pressão se eleve mais rapidamente. Dessa forma, o tempo de filtração para se atingir a mesma queda de pressão diminui com o aumento da velocidade superficial de filtração resultando em tortas de filtração mais finas.

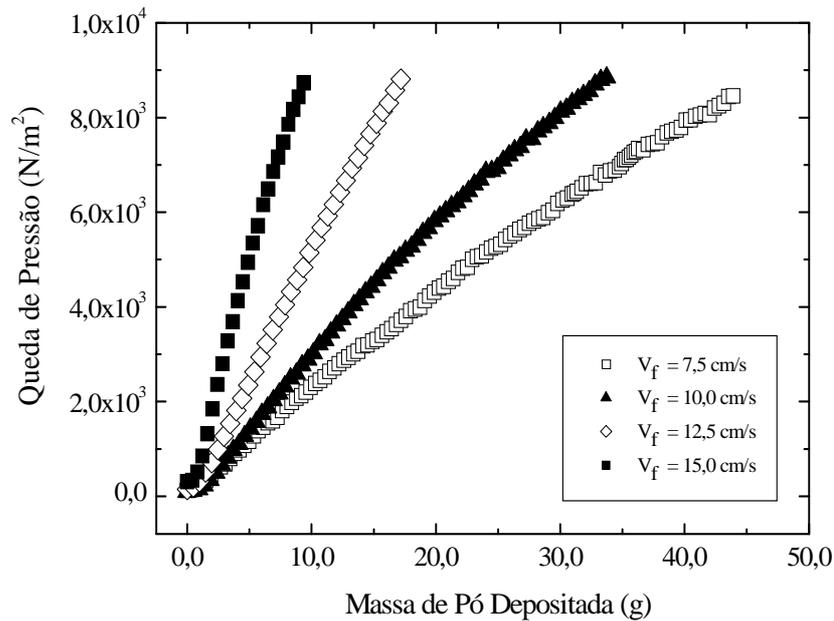


Figura 4.7 - Queda de pressão em função da massa de pó depositada para as quatro velocidades superficiais de filtração testadas.

4.2. Determinação da porosidade das tortas de filtração

A porosidade das tortas de filtração dos dois materiais pulverulentos estudados tanto nos ensaios de filtração à velocidade constante (10 cm/s), como para aquelas obtidas a diferentes velocidades (queda de pressão constante - 8826 N/m²), foi determinada por meio dos métodos direto e indireto. No método indireto, assumiu-se que o escoamento do fluido através da torta era descrito pela equação de Ergun modificada (Eq. 2.11) e para o cálculo utilizando o método direto, utilizou-se a técnica previamente descrita no item 3.4.2 (AGUIAR, 1995).

4.2.1. Método indireto

Para determinar a porosidade média pelo método indireto, utilizou-se a Equação de Ergun modificada (Equação 2.11) e a para partículas rugosas para a rocha (Equação 2.14), uma vez que o material apresenta superfície áspera. Para o talco, a Equação de MacDonald para partículas não - rugosas (Equação 2.15) foi utilizada, pois este material apresenta superfície lisa (Figura 4.10).

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, os valores médios de porosidade encontrados para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para os dados da Figura 4.1 (Tabela 4.1) e da Figura 4.3 (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 – Valores de porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para os dados da Figura 4.1.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	Eq. de Ergun Modificada (Eq. 2.11)	Eq. de MacDonald (Eq. 2.14)	Desvio (%)
1	100	0,49	0,51	4,08
2	300	0,45	0,47	4,44
3	600	0,43	0,45	4,65
4	900	0,44	0,46	4,54
5	1200	0,46	0,48	4,35

Tabela 4.2 – Valores de porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para os dados da Figura 4.3.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	Eq. de Ergun Modificada (Eq. 2.11)	Eq. de MacDonald (Eq. 2.14)	Desvio (%)
1	100	0,52	0,55	5,77
2	300	0,49	0,51	4,08
3	600	0,46	0,49	6,52
4	900	0,44	0,47	6,82
5	1200	0,43	0,45	4,65

Os valores de porosidade média obtidos para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de acrílico para os dados da Figura 4.2 e da Figura 4.4 são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, respectivamente.

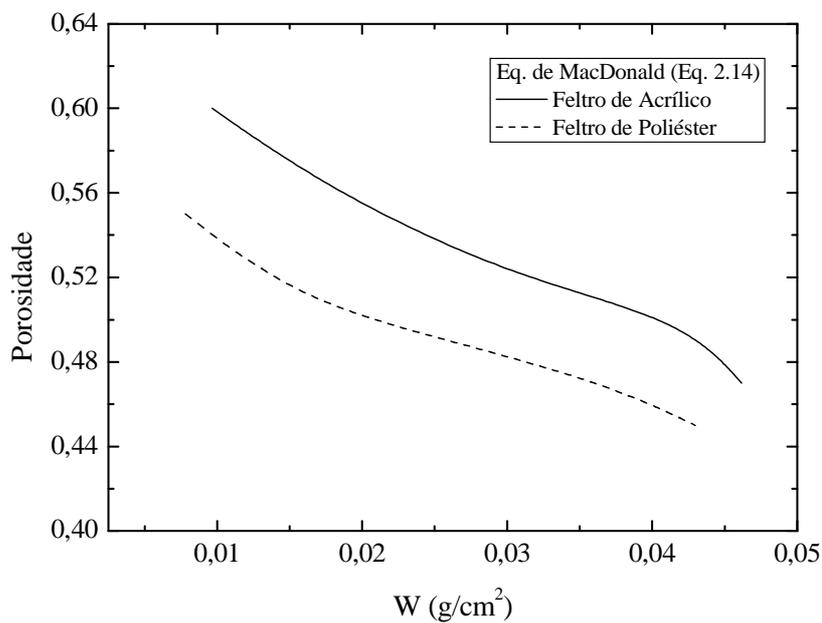
Tabela 4.3 - Valores de porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de acrílico para os dados da Figura 4.2.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	Eq. de Ergun Modificada (Eq. 2.11)	Eq. de MacDonald (Eq. 2.14)	Desvio (%)
1	100	0,58	0,61	5,17
2	300	0,51	0,53	3,92
3	600	0,49	0,51	4,08
4	900	0,47	0,49	4,26

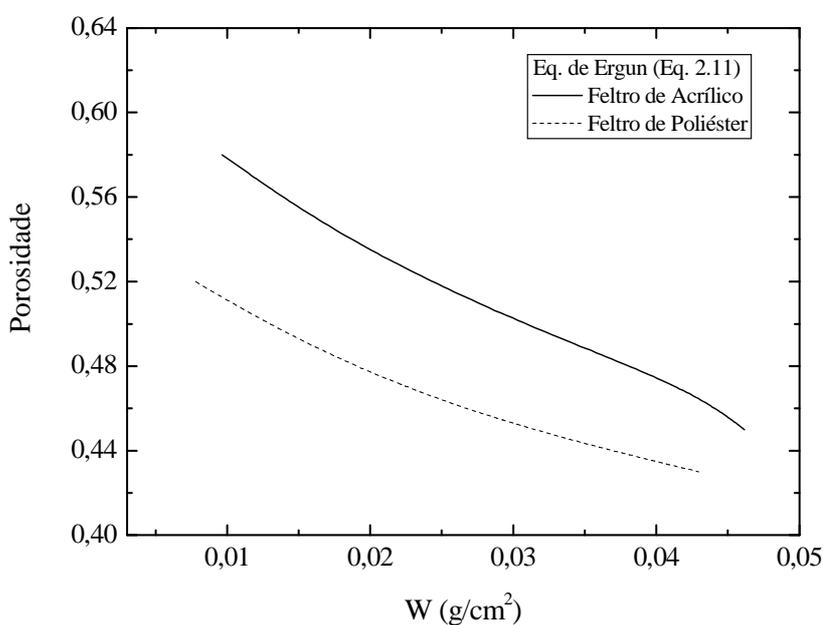
Tabela 4.4 - Valores de porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para a rocha fosfática a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de acrílico para os dados da Figura 4.4.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	Eq. de Ergun Modificada (Eq. 2.11)	Eq. de MacDonald (Eq. 2.14)	Desvio (%)
1	100	0,58	0,60	3,45
2	300	0,54	0,56	3,70
3	600	0,50	0,52	4,00
4	900	0,47	0,50	6,38
5	1200	0,45	0,47	4,44

A Figura 4.8 mostra uma comparação entre as porosidades calculadas (a) pela Equação de Ergun (Eq. 2.11) e (b) pela Equação de MacDonald (Eq. 2.14) para os valores das Tabelas 4.2 e 4.4 para os dois tipos de tecido.



(a)



(b)

Figura 4.8 – Comparação entre os valores da porosidade das tortas de rocha fosfática para os dois tecidos utilizados e de acordo com as Tabelas 4.2 e 4.4 e obtidos através das equações: (a) 2.11 e (b) 2.14.

Observa-se que os valores de porosidade obtidos para o feltro de acrílico são, em média, 9,30% maiores que aqueles obtidos para o feltro de poliéster quando a Equação de

Ergun foi utilizada e 7,84% maiores quando a equação de MacDonald foi utilizada. Analisando as Figuras 4.3 e 4.4, percebe-se que as cargas mássicas depositadas na superfície do poliéster foram um pouco menores que as depositadas no acrílico para uma mesma queda de pressão. De acordo com Paschoal e Aguiar (2008), o acrílico tem a capacidade de coletar uma maior massa de material numa mesma queda de pressão que outros feltros. Tanabe (2008) verificou que, apesar dos feltros possuírem propriedades muito semelhantes como visto na Tabela 3.2, o poliéster apresenta profundidade média de deposição de partículas menor que a do acrílico. O autor concluiu que a maior intensidade no tratamento superficial do tecido (chamuscagem/calandragem) conferiu ao poliéster uma estrutura mais fechada que o acrílico interferindo no processo de deposição das partículas no interior do tecido. Assim, conclui-se que a deposição das partículas no interior do feltro de poliéster ocorre mais próximo da superfície do meio filtrante resultando em um “entupimento” mais rápido gerando tortas mais finas que no feltro de acrílico.

A Tabela 4.5 traz os valores de porosidade média para tortas de talco a velocidade de filtração constante.

A Tabela 4.6 traz os valores de porosidade média para tortas de talco obtidas ao se variar a velocidade de filtração.

Os valores de porosidade que geraram as médias apresentadas nas Tabelas 4.1 a 4.6 encontram-se no Apêndice C.

Tabela 4.5 - Valores de porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para o talco a velocidade constante de 10 cm/s e variando com o tempo (s) e queda de pressão na filtração (ΔP) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster.

ΔP (mmH ₂ O)	Eq. de Ergun Modificada (Eq. 2.11)	Eq. de MacDonald (Eq. 2.15)	Eq. de Endo (Eq. 2.18)
300	0,80	0,82	0,57
600	0,79	0,81	0,56
900	0,76	0,79	0,54
1200	0,79	0,82	0,76

Tabela 4.6 - Valores de porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos por equações da literatura para o talco para uma queda de pressão máxima de aproximadamente 8826 N/m^2 variando com a velocidade de filtração (cm/s) e tempo (s) tendo como meio filtrante o feltro de poliéster.

Velocidade (cm/s)	Eq. de Ergun Modificada (Eq. 2.11)	Eq. de MacDonald (Eq. 2.15)	Eq. de Endo (Eq. 2.18)
7,5	0,77	0,79	0,74
10,0	0,76	0,78	0,54
12,5	0,73	0,75	0,50
15,0	0,67	0,69	0,44

Observa-se pelas Tabelas 4.1 a 4.6 que os valores de porosidade média obtidos pelas Equações (2.14) e (2.15) apresentam valores ligeiramente maiores que aqueles obtidos pela Equação (2.11), uma vez que a Equação de MacDonald foi gerada a partir da Equação de Ergun. Pelas Tabelas 4.1 a 4.4 pode ser visto que a porosidade das tortas geradas à velocidade constante diminui com o tempo. Segundo Chen e Hsiau (2009a), isto é esperado para tortas não muito espessas, por causa da compactação sofrida pelas camadas mais próximas à interface torta - tecido devido ao aumento da carga mássica de pó sobre estas camadas. Schmidt (1995) também verificou experimentalmente que, à medida que a queda de pressão aumenta, a porosidade da torta diminui. No entanto, pode-se notar que, após diminuir, a porosidade nas Tabelas 4.1 e 4.5 voltam a aumentar.

Através das Tabelas, observa-se que os valores de porosidade das tortas formadas pelo talco apresentam o mesmo comportamento que as tortas de rocha obtidas no mesmo tecido (poliéster) a velocidade constante e também que a porosidade diminui com o aumento da velocidade superficial de filtração. Observa-se, também, que os valores de porosidade obtidos para as tortas de talco são maiores que aqueles obtidos para as tortas de rocha fosfática. Este comportamento está de acordo com o observado por Chen e Tsai (1998), lembrando que a rocha fosfática possui formato mais próximo de uma esfera (circularidade = 0,60) que o talco (circularidade = 0,20). Conforme os autores, partículas de formatos irregulares com pequena faixa de distribuição granulométrica são conduzidas ao filtro intercalando uma sobre a outra ao acaso e irregularmente, aumentando a porosidade da torta, enquanto partículas esféricas preenchem mais os espaços intersticiais permitindo uma menor porosidade. Endo et al. (2001) determinaram a porosidade de tortas de vários materiais e

concluíram que partículas irregulares polidispersas tiveram porosidades maiores que das partículas esféricas polidispersas.

Como o formato das partículas do talco diferencia-se bastante do formato circular, testou-se a Equação de Endo et al. (1998) (Eq. 2.18), pois a mesma leva em consideração parâmetros geométricos da partícula, inclusive o seu fator de forma dinâmico. O fator de forma dinâmico do talco foi tomado como sendo 2,04; valor proveniente da literatura (DAVIES, 1979). Os valores obtidos (Tabela 4.5 e 4.6) foram menores em relação à Equação de Ergun (Eq. 2.11) e de MacDonald (Eq. 2.15).

A Figura 4.9 mostra uma comparação entre os valores de queda de pressão obtidos até uma queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m^2 para os dois pós tendo como meio filtrante o feltro de poliéster. A Figura 4.10 compara os valores de porosidade média calculados através da Equação de Ergun (Eq. 2.11) para os dados da Figura 4.9. A análise destas Figuras confirma os valores mais altos de porosidade para o talco e mostra que este parâmetro está diretamente relacionado à queda de pressão no filtro. Tortas menos porosas imprimem maior resistência ao fluxo de ar resultando em maiores valores de queda de pressão.

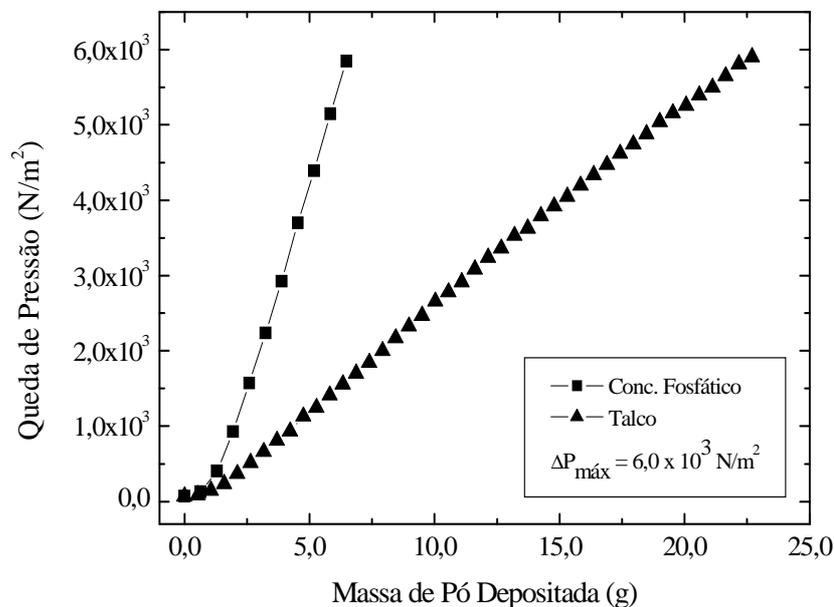


Figura 4.9 – Comparação entre os valores de queda de pressão em função da massa de pó depositada sobre o meio filtrante de poliéster para uma queda de pressão máxima de 6000 N/m^2 para os dois pós.

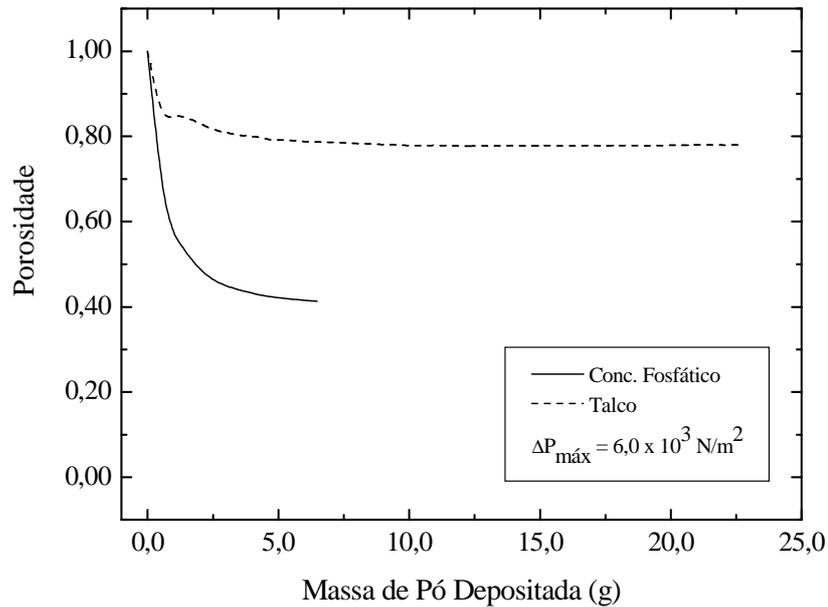


Figura 4.10 – Comparação entre os valores médios da porosidade de uma torta de talco e outra de rocha calculados com auxílio da Equação 2.11 em função da massa de pó depositada tendo como meio filtrante o feltro de poliéster para uma queda de pressão máxima de 6000 N/m^2 .

4.2.2. Método direto

4.2.2.1. Rocha Fosfática

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram os resultados obtidos para as tortas geradas na filtração da rocha tendo como meio filtrante o poliéster (tortas obtidas para as filtrações representadas pela Figura 4.1) e o acrílico (tortas obtidas para as filtrações representadas pela Figura 4.2 juntamente com a torta obtida para $\Delta P \approx 11768 \text{ N/m}^2$ - Figura 4.4), respectivamente. Observa-se que à medida que se aproxima do tecido, há uma pequena diminuição no valor da porosidade. Esse comportamento repetiu-se para todas as tortas em questão, com exceção da torta obtida a aproximadamente 2942 N/m^2 tendo o acrílico como meio filtrante. As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam os valores médios encontrados para cada posição na torta.

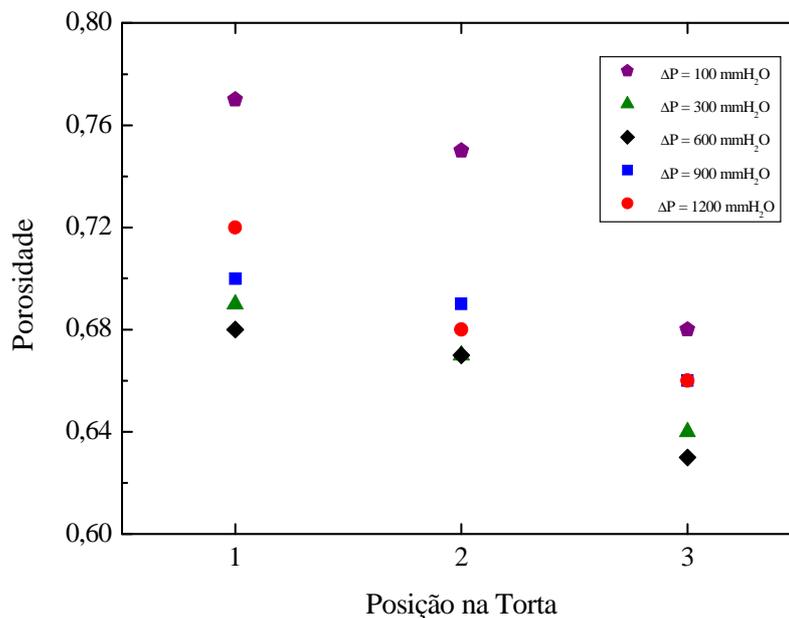


Figura 4.11 – Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o poliéster para tortas de rocha obtidas em diferentes quedas de pressão máxima (ou diferentes espessuras).

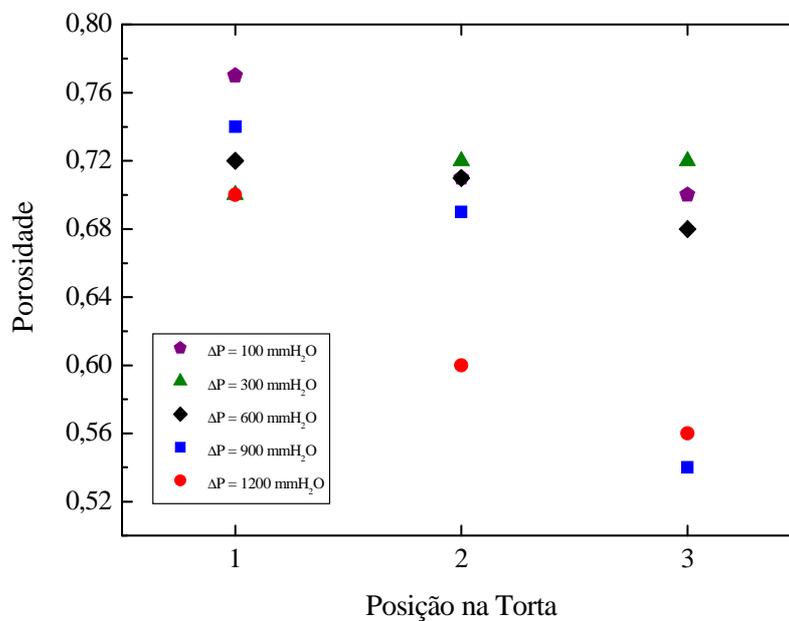


Figura 4.12 – Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o acrílico para tortas de rocha obtidas em diferentes quedas de pressão máxima (ou diferentes espessuras).

Tabela 4.7 – Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de poliéster, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	ε (média) (1)	ε (média) (2)	ε (média) (3)	ε (média) (total)
1	100	0,77	0,75	0,68	0,73
2	300	0,69	0,67	0,64	0,67
3	600	0,68	0,67	0,63	0,66
4	900	0,70	0,69	0,66	0,68
5	1200	0,72	0,68	0,66	0,69

Tabela 4.8 – Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o feltro de acrílico, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	ε (média) (1)	ε (média) (2)	ε (média) (3)	ε (média) (total)
1	100	0,77	0,71	0,70	0,73
2	300	0,70	0,72	0,72	0,71
3	600	0,72	0,71	0,68	0,70
4	900	0,74	0,69	0,54	0,66
5	1200	0,70	0,60	0,56	0,63

Na Tabela 4.7 é possível notar que a porosidade média em cada posição (e a porosidade média total de cada torta) diminui até o valor de queda de pressão de 5884 N/m², quando volta a crescer. Este comportamento também foi observado por Negrini et al. (2001) ao investigar o comportamento da porosidade de tortas de rocha fosfática a uma velocidade de filtração de 6,8 cm/s utilizando o feltro de poliéster como meio filtrante. Uma possível explicação para esse acontecimento seria a quantidade de pó depositada na superfície do tecido. Na Figura 4.1, pode ser visto que o valor da carga mássica depositada na superfície do meio filtrante é alto. Uma vez que a porosidade tende a ser maior à medida que se aproxima da interface torta – ar, uma torta mais espessa teria uma região mais porosa maior e esse efeito se destacaria sobre o efeito de compressibilidade, mencionado no item 2.2.4 e observado na Figura 2.3, causado pela carga mássica depositada sobre as camadas inferiores da torta.

O comportamento supracitado não é observado para as tortas obtidas tendo o acrílico como meio filtrante (veja a Figura 4.12 e a Tabela 4.8). A Figura 4.12 e a Tabela 4.8 mostram apenas o comportamento de diminuição da porosidade com o incremento da queda de pressão. Os dados dessa Figura e Tabela são para as tortas obtidas nas filtrações

representadas pela Figura 4.2, onde se nota que os valores de carga mássica depositada na superfície do meio filtrante não são tão altos como os representados na Figura 4.1.

4.2.2.2. Talco

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram os resultados obtidos para as tortas geradas na filtração do talco tendo como meio filtrante o poliéster a velocidade de filtração constante e variante, respectivamente. Observa-se que à medida que se aproxima do tecido, há uma pequena diminuição no valor da porosidade (da posição 1 para a 2 e da posição 2 para a 3). Esse comportamento repetiu-se para todas as tortas em questão, com exceção da torta obtida a 5884 N/m^2 (onde não há diminuição da porosidade da posição 1 para a posição 2) na Figura 4.13 e da torta obtida a $V_f = 7,5 \text{ cm/s}$ (onde também tem-se a mesma porosidade nas posições 1 e 2) na Figura 4.14. As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os valores médios encontrados para cada posição na torta.

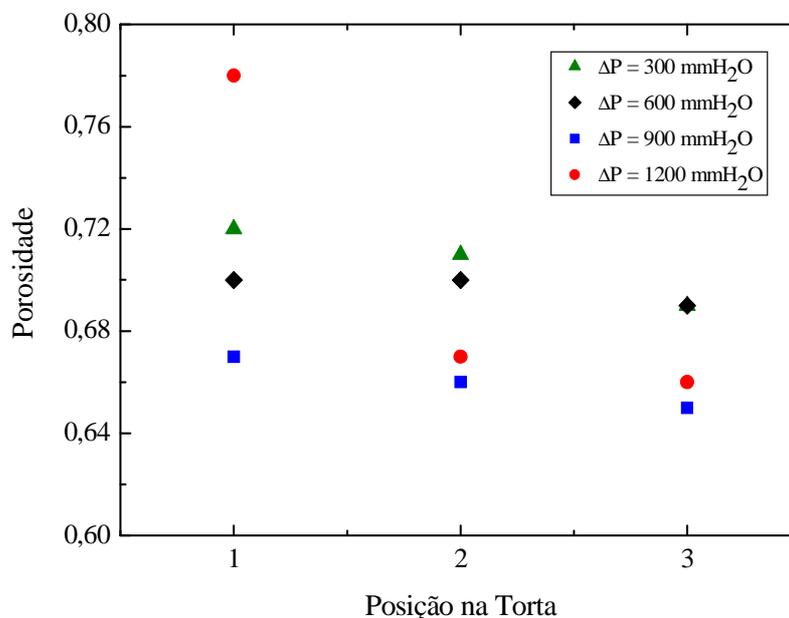


Figura 4.13 – Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o poliéster para tortas de talco obtidas em diferentes quedas de pressão máxima (ou diferentes espessuras).

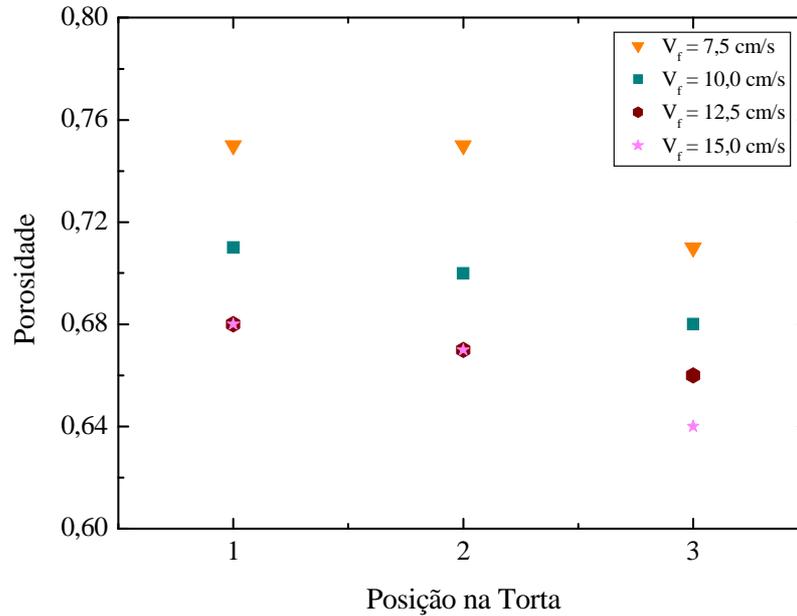


Figura 4.14 – Comportamento entre os valores médios da porosidade estimada na interface torta – ar (posição 1), no centro (posição 2) e na interface torta – tecido (posição 3) para os ensaios realizados com o poliéster para tortas de talco obtidas a mesma queda de pressão e diferentes velocidades de filtração.

Tabela 4.9 – Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para o talco tendo como meio filtrante o feltro de poliéster, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.

Ensaio	ΔP (mmH ₂ O)	ϵ (média) (1)	ϵ (média) (2)	ϵ (média) (3)	ϵ (média) (total)
1	300	0,72	0,71	0,69	0,71
2	600	0,70	0,70	0,69	0,70
3	900	0,67	0,66	0,65	0,66
4	1200	0,78	0,67	0,66	0,70

Tabela 4.10 – Valores da porosidade média das tortas de filtração de gases obtidos experimentalmente para o talco tendo como meio filtrante o feltro de poliéster e a velocidades diferentes, de acordo com a posição na torta: (1) interface torta – ar; (2) centro da torta e (3) interface torta – tecido.

Ensaio	Velocidade (cm/s)	ϵ (média) (1)	ϵ (média) (2)	ϵ (média) (3)	ϵ (média) (total)
1	7,5	0,75	0,75	0,71	0,74
2	10,0	0,71	0,70	0,68	0,70
3	12,5	0,68	0,67	0,66	0,67
4	15,0	0,68	0,67	0,64	0,66

Na Tabela 4.9 é possível notar que a porosidade média em cada posição (e a porosidade média total de cada torta) diminui até o valor de queda de pressão de 8826 N/m^2 , quando volta a crescer. Salienta-se o alto valor de porosidade na interface torta – ar da torta mais grossa (obtida a queda de pressão máxima de $1200 \text{ mmH}_2\text{O}$). Na Figura 4.5, pode ser visto que os valores de carga mássica depositada na superfície do meio filtrante são bem altos. Dessa maneira, este comportamento pode ser explicado pelo esquema proposto por Choi et al. (2004a), Figura 2.3 e como já feito no item 4.2.2.1.

Os valores de porosidade média encontrados para as tortas obtidas a velocidade diferentes (Tabela 4.10), diminuem com o aumento da velocidade superficial de filtração. A velocidades mais altas, a queda de pressão tem os maiores valores (veja Figura 4.7), o que implica em forças de arraste maiores. O fato de a porosidade média diminuir com o aumento da velocidade de filtração pode ser explicado através de um modelo proposto por Choi et al. (2004b). Nesse modelo, é assumido que a torta de filtração é formada por camadas de partículas. A força de arraste atuando sobre as camadas superiores a uma determinada camada geraria um movimento das partículas da camada superior à camada em questão. Assim, os espaços vazios seriam preenchidos causando uma diminuição na porosidade da torta. Dessa forma, como a maiores velocidades a queda de pressão é mais alta, maiores forças de arraste atuariam na torta a maiores velocidades e gerariam estruturas mais compactas.

4.2.3. Comparação da porosidade calculada pelos métodos indireto e direto

Nas Figuras 4.15 a 4.16 estão representados os valores de porosidade média estimados através das equações da literatura e obtidos experimentalmente para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster e o acrílico para os dados das Figuras 4.1 e 4.2 (juntamente com a torta obtida para $\Delta P = 1200 \text{ mmH}_2\text{O}$ - Figura 4.4), respectivamente.

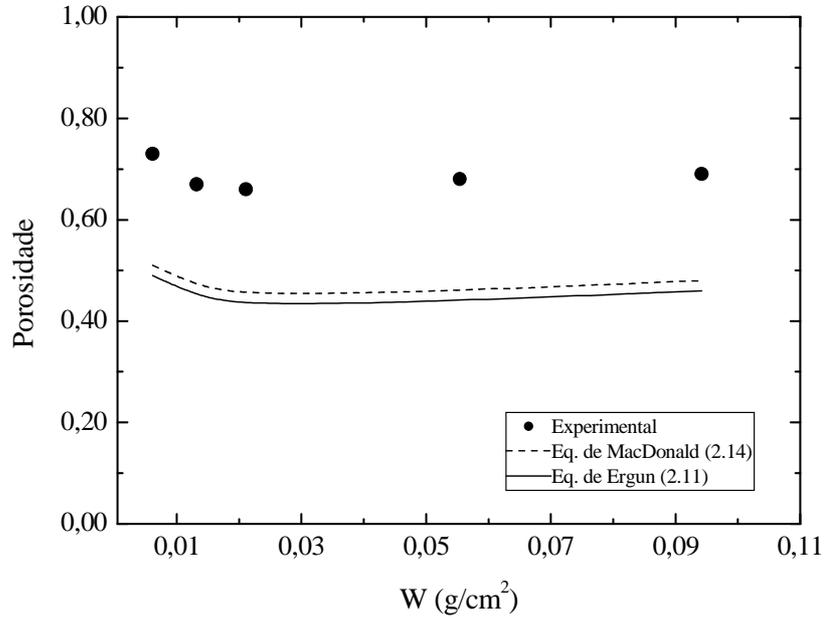


Figura 4.15 – Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11 e 2.14 e pelo método direto em função da quantidade de massa depositada por unidade de área do meio filtrante de poliéster para a rocha fosfática.

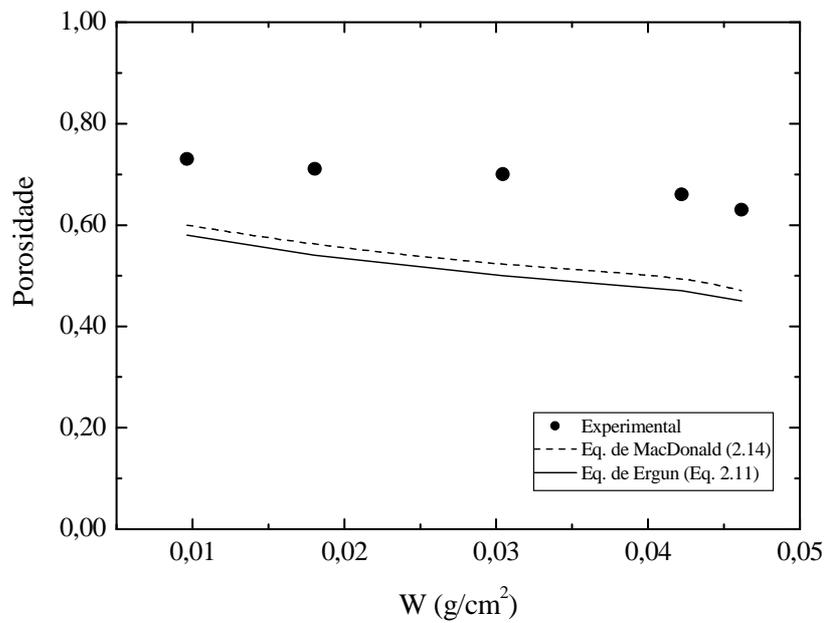


Figura 4.16 – Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11 e 2.14 e pelo método direto em função da quantidade de massa depositada por unidade de área do meio filtrante de acrílico para a rocha fosfática.

Nas Figuras 4.15 e 4.16, verifica-se que os valores de porosidade obtidos pelos métodos direto e indireto foram discordantes. Quando o feltro de poliéster foi utilizado (Figura 4.15), a porosidade média experimental foi de 49 a 55% maior que aquela estimada pela Equação de Ergun modificada e de 43 a 48% maior que a estimada pela Equação de MacDonald. Quando o feltro de acrílico foi utilizado (Figura 4.16), a porosidade média experimental foi de 26 a 40% maior que aquela estimada pela Equação Ergun modificada e de 20 a 37% maior que a estimada pela Equação de MacDonald. No entanto, os resultados mostraram a mesma tendência funcional.

Nas Figuras 4.17 a 4.18 estão representados os valores de porosidade média estimados através das equações da literatura e obtidos experimentalmente para o talco a velocidade constante e a diferentes velocidades, respectivamente.

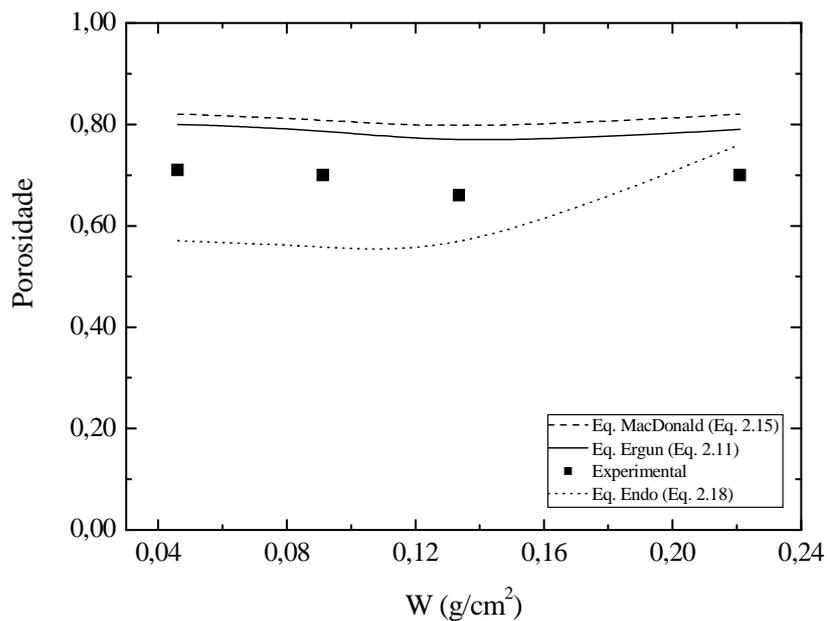


Figura 4.17 – Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11, 2.15 e 2.18 e pelo método direto em função da quantidade de massa depositada por unidade de área do meio filtrante de poliéster para o talco.

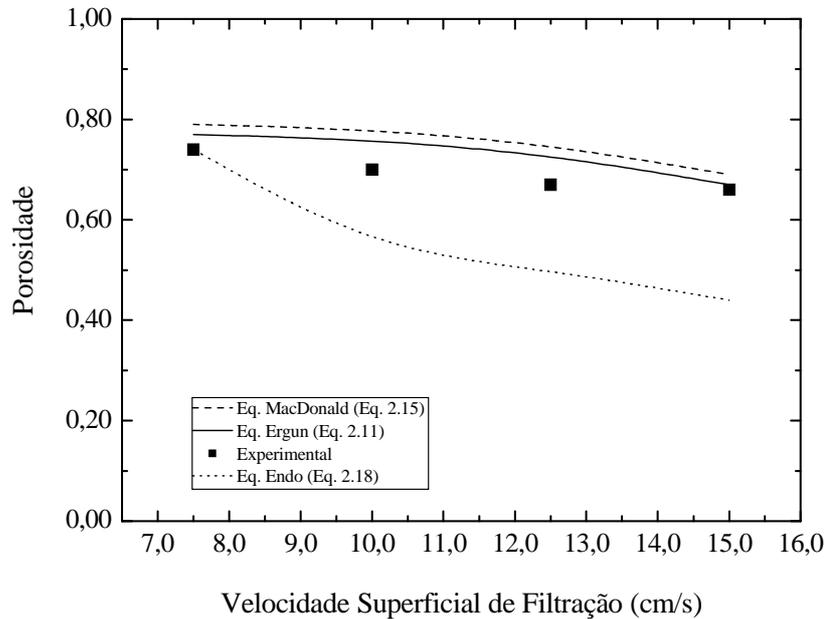


Figura 4.18 – Comparação das porosidades médias estimadas pelas Equações 2.11, 2.15 e 2.18 e pelo método direto em função da velocidade superficial de filtração tendo o poliéster como meio filtrante para o talco.

Ao contrário dos resultados obtidos para a rocha fosfática, onde os valores de porosidade obtidos experimentalmente são maiores que os estimados através de equações, os resultados para as tortas de talco apresentam valores de porosidade média experimental menores que aqueles encontrados pelas equações. No entanto, os valores experimentais para as tortas de talco tem um desvio menor em relação aos valores estimados. No caso das tortas obtidas a velocidade constante (Figura 4.17), a porosidade média experimental foi de 11 a 13% menor que aquela estimada pela Equação de Ergun modificada, de 13 a 16% menor que a estimada pela Equação de MacDonald e de 22 a 25% maior que a estimada pela Equação de Endo, exceto para a torta mais espessa quando a porosidade experimental foi 8% menor que a estimada pela Equação de Endo. É possível notar, pela Figura 4.18, que estes desvios são ainda menores (exceto para os valores obtidos com a Equação de Endo) quando se variou a velocidade superficial de filtração. Nesse caso, a porosidade média experimental foi de 1 a 8% menor que aquela estimada pela Equação de Ergun modificada, de 4 a 11% menor que a estimada pela Equação de MacDonald e de 0 a 50% maior que a estimada pela Equação de Endo. Nestas Figuras também se averigua que os valores de porosidade experimental e estimados possuem o mesmo comportamento. Além disso, verifica-se que, em geral, a Equação de Endo foi a que resultou em valores mais díspares em relação aos experimentais.

A partir desses resultados, é possível verificar que, apesar dos valores de porosidade média calculados pelas equações de Ergun, MacDonald e Endo terem a mesma tendência funcional que os encontrados experimentalmente, o método direto mostra-se mais eficiente na determinação dos valores de porosidade, uma vez que leva em consideração diferentes regiões da torta de filtração e não restringe o tamanho e formato da partícula.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e tendo em vista os objetivos propostos, as principais conclusões são:

- As curvas de filtração para a rocha fosfática tendo os feltros de poliéster e acrílico são reprodutíveis.
- A uma mesma queda de pressão e utilizando-se o mesmo meio filtrante, há uma maior deposição de partículas quando o talco foi empregado como material particulado. Além disso, as tortas de talco são mais porosas que as tortas formadas por rocha fosfática, possivelmente por causa dos diferentes formatos e outras características físicas dessas partículas.
- Os valores de porosidade estimados pelas equações da literatura tiveram o mesmo comportamento daqueles encontrados pelo método direto, apesar de seus valores diferirem entre si, sendo os desvios maiores para as tortas formadas por rocha fosfática e menores para as tortas formadas por talco a diferentes velocidades. A disparidade entre os valores experimentais e teóricos provavelmente se deu, pois, através do método direto, determina-se a porosidade média através de medições em diferentes regiões da torta e não há restrição quanto ao tamanho e formato de partículas.
- Os valores de porosidade encontrados experimentalmente para as tortas de rocha fosfática são maiores que os encontrados pelas Equações de Ergun e MacDonald e menores para as tortas de talco.
- Os valores de porosidade média encontrados através da Equação de Endo (Equação 2.18) foram os que mais se distanciaram dos valores obtidos experimentalmente para as tortas de talco.
- As tortas obtidas apresentaram um comportamento de compressibilidade, uma vez que a porosidade variou ao longo da torta.

- A porosidade na interface torta-tecido é menor que na interface torta-ar quando os dois tecidos estudados foram utilizados.
- A porosidade média total das tortas dos dois materiais decresceu com o aumento da queda de pressão, exceto para as tortas mais espessas.
- A porosidade média total decresceu e depois sofreu um aumento com o incremento da queda de pressão para as tortas mais espessas de rocha e talco, mostrando que a carga mássica depositada no filtro influencia na porosidade total.
- A porosidade média experimental diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como prosseguimento aos estudos realizados neste trabalho e para melhor entendimento do processo de filtração e do comportamento das tortas de filtração de gases, sugere-se o seguinte:

- O estudo das tortas de filtração formadas por outros materiais particulados com características distintas;
- Estudar mais profundamente a influência do formato das partículas na formação e na porosidade média das tortas;
- Verificar se a porosidade depende do raio e/ou posição angular na torta;
- Averiguar a possibilidade de se obter uma correlação empírica que melhor se ajuste aos dados experimentais de filtração e porosidade encontrados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABINT. Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos Técnicos. Disponível em: <www.abint.org.br>. Acesso em: 04 dez. 2009.
- AGUIAR, M. L. **Filtração de gases em filtros de tecido**: deposição e remoção da camada de pó formada. 1995. 123 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- AGUIAR, M. L.; COURY J. R. Cake formation in fabric filtration of gases. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 35, n. 10, p. 3673-3679, 1996.
- ALLEN, T. **Particle size measurement**. 5ª ed. London: Champman and Hall. 1997.
- ALIBABA. O pó de talco. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/talc-powder-255991624.html>>. Acesso em: 05 dez. 2009.
- AL-OTOOM, A. Y. Prediction of the collection efficiency, the porosity, and the pressure drop across filter cakes in particulate air filtration. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 51-57, 2005.
- BOSKOVIC, L. et al. Influence of Particle Shape on Filtration Processes. **Aerosol Science and Technology**, v. 39, p.1184 – 1190, 2005.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Geologia, mineração e transformação mineral. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/sgm/noticias/destaque_foto/destaque_0014.html>. Acesso em: 08 dez. 2009.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual de procedimentos para os serviços de saúde – doenças relacionadas ao trabalho**. Brasília, 2001. 290 p.
- CALLÉ, S.; et al. Description of the clogging and cleaning cycles of filter media. **Powder Technology**, v.123, p.40-52, 2002.
- CAPITANI, E. M., Prevalência de pneumoconiose em trabalhadores expostos à rocha fosfática. **Rev. Saúde Pública**, v. 23, p. 98-106, 1989.

CARMAN, P. C. **Flow of gases through porous media**. New York, Academic Press, 1956.

CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. Cake formation and growth in cake filtration. **Powder Technology**, v. 192, p. 217-224, 2009a.

CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. Influence of filtration superficial velocity on cake compression and cake formation. **Chemical engineering and processing**, v. 48, p. 988-996, 2009b.

CHENG, Y. H.; TSAI, C. J. Factors Influencing Pressure Drop through a Dust Cake during Filtration. **Journal of Aerosol Science and Technology**, v.29, n.4, p.315-328, 1998.

CHOI, J. H.; HA, J. S.; JANG, H. J. Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter. **Powder Technology**, v. 140, p. 106-115, 2004a.

CHOI, J. H.; et al. Experimental investigation into compression properties of integrated coal gasification combined cycle fly ashes on a ceramic filter. **Korean J. Chem. Eng.**, v. 21, n.3, p. 726-732, 2004b.

COURY, J. R.; AGUIAR, M. L. Rupture of dry agglomerates. **Powder Technology**, v.85, p.37-43, 1995.

DAVIES, C. N. **Journal of Aerosol Science**, v. 10, p.477, 1979.

DENNIS, R.; KLEMM, H. A. Recent concepts describing fabric filter system behavior. **Filtration and Separation**. p.22, 1982.

DONOVAN, R. P. **Fabric filtration for combustion sources**. Marcel Dekker Inc., New York, 1985.

DUECK, J. et al. Computer simulation of filter cake structure. In: FILTECH, 2007, Alemanha. **Proceedings...** Alemanha, 2007, v. I, p. I-62 a p. I-70.

ENDO, Y.; CHEN, D. R.; PUI, D. Y. H. Effect of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading and air filters. **Powder Technology**, v. 98, p. 241, 1998.

ENDO, Y.; CHEN, D. R.; PUI, D. Y. H. Air and water permeation resistance across dust cakes on filters – effects of particle polydispersity and shape factor. **Powder Technology**, v. 118, p. 24-31, 2001.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v.48, n.2, p.89-94, 1952.

GELDART, D. Powder Processing – The Overall View. In RHODES, M. **Principles of powder technology**. Ed. John Wiley & Sons Ltd. p 1-7, 1990.

GRAEF, A.; STENHOUSE, J. T. I.; WALSH, D.C. The effect of solid aerosol on prefilter material performance. **Journal of Aerosol Science**, v. 26, suppl 01, p.S741-S742, 1995.

HAPPEL, J.; BRENNER, H. **Low Reynolds number hydrodynamics**. Marinius Nijhoff Publishers. 2^a ed., 1986.

HINDS, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior and measurement of airborne particles**. Wiley Interscience, New York, 1999.

HOEFLINGER, W.; RUD, H.; MAUSCHITZ, G. Estimation of the particle penetration and the dust holding capacity of different surface-treated needle felts. **Separation and Purification Technology**, v. 58, p. 256-261, 2007.

ITO, L. X. **Estudo da porosidade de torta de filtração de gás**. 2002. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

ITO, L. X.; AGUIAR, M. L. Experimental investigation into the compression of dust cakes deposited on filter media. **Brazilian journal of chemical engineering**, v. 26, p. 00-00, 2009.

JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T.; LIU, B. Y. H. Effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous filter. **Journal of Aerosol Science**, v.28, n.01, p.147-158, 1997.

JEON, K.; JUNG, Y. A. Simulation study on the compression behavior of dust cakes. **Powder Technology**, v. 141, p.1-11, 2004.

KIM, J. H. et al. Temperature effect on the pressure drop across the cake of coal gasification ash formed on a ceramic filter. **Powder Technology**, v. 181, p. 67-73, 2008.

LEITH, D.; ALLEN, R. W. K. Dust filtration by fabric filters. In: **Progress in Filtration**, R. J. Wakman (ed.) Elsevier, N. L, v. 4, p. 1-57, 1986.

LINOYA, K.; ORR, C. Jr. **Air pollution** – vol. III: source of air pollution and their control; edited by Arthur C. Stern, 2nd edition, Academic Press, New York, 1968.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2 ed., Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2002.

LYDON, R. P. Advances relating to filter media developments. In: World Filtration Congress, 10., 2008, Leipzig. **Proceedings...** Leipzig, Alemanha, 2008. v. II, p. II-19 a p. II-29.

LUCAS, R.D. **Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos..** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP. 2000.

MACDONALD, J. F. et al. Flow through porous media – the Ergun equation revisited. **Industrial Engineering Chemistry Fundamentals**, vol. 18, 1979.

MAUSCHITZ, G.; RUD, H.; HOEFLINGER, W. Particle deposition in the depth of nonwoven dust filter media and its effect on filter clogging. In: FILTECH, 2007, Alemanha. **Proceedings...** Alemanha, 2007, v. II, p. II-34 a p. II-41.

MEDIPÉDIA. Disponível em:

<<http://www.medipedia.pt/home/home.php?module=artigoEnc&id=227>> Acesso em 08 dez. 2009.

MF RURAL. Disponível em:

<<http://www.mfrural.com.br/detalhe.asp?cdp=30470&mnop=Fertilizante-Fosfatado-F-5-p-ensacado-ou-a-granel-Pastagens-soja-eucalipto-cafe-citrus-etc.www.mfrural.com.br>>. Acesso em 08 dez. 2009.

MINAS GERAIS. CODEMIG - Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais. Disponível: <http://www.comig.com.br/site/content/parcerias/parcerias_detalhe.asp?id=36> Acesso em 07 dez. 2009.

NEGRINI, V. S.; et al. Determinação da porosidade de tortas de filtração de gases em função da velocidade superficial de filtração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 23, 2000 São João Del-Rei, **Anais...**, Teresópolis, RJ, p. 191-197, 2001.

NEIVA, A. C. B.; GOLDSTEIN JR., L. A procedure for calculating pressure drop during the build-up of dust filter cakes. **Chemical Engineering and Processing**, v. 42, p. 495-501, 2003.

NEIVA, A. C. B. et al. Modeling of cake compressibility on gas filtration. In: High temperature gas cleaning, G. Kaspar, G. Hemmer, A. Dittler (Ed). Karlsruhe. **Proceedings...** Karlsruhe, Alemanha, 1999. v. 2, p. 83-95.

NETO, O. G. S. **Estudo da porosidade de tortas em filtros de manga operando na filtração de gases**. 2002. 180 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química Universidade Federal de São Carlos, 2002.

O BÊ-A-BA DO SERTÃO. Disponível em:
<http://www.obeabadosertao.com.br/v3/garimpeiros_paraibanos_querem_fortalecer_producao_mineral_2232.html>. Acesso em: 08 dez. 2009.

PARK, P-K; LEE, C-H; LEE, S. Determination of cake porosity using image analysis in a coagulation-microfiltration system. **Journal of Membrane Science**. v. 293, p. 66-72, 2007.

PASCHOAL, P. A. Estudo da influência da velocidade de limpeza no processo de filtração de gases em filtros de polipropileno. **Anais do XXXIII ENEMP**, 2007.

PASCHOAL, P. A.; AGUIAR, M. L. Gas filtration: influence of operational variables on cake formation and detachment in different filter types. In: World Filtration Congress, 10., 2008, Leipzig. **Proceedings...** Leipzig, Alemanha,, 2008. v. III, p.III-393 a III-397.

PAYATAKES, A. C. Model of transient aerosol particles deposition in fibrous media with dendritic pattern. **AIChE Journal**, v.23, n. 2, 1977.

PERKINS, H. **Air Pollution**, McGraw Hill Book Company, p.234, 1974.

PONTES, I. F.; ALMEIDA, S. L. M. Talco. In: Centro de Tecnologia Mineral (Ministério da Ciência e Tecnologia) **Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2005, p. 607-628.

RODRIGUES, A. C. M. **Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecido de polipropileno e algodão.** 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2004.

RODRIGUES, K. B. **Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes.** 2006. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química Universidade Federal de São Carlos, 2006.

SALEEM, M.; KRAMMER, G. Optical in-situ measurement of filter cake height during bag filter plant operation. **Powder Technology**, v. 173, p. 93-106, 2007.

SANCHES, J. R. et al. Comparative study of different fabrics in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes. **Filtration and Separation**, p. 593-598, July/August, 1997.

SCHMIDT, E. Experimental investigations into the compression of dust cakes on filter media. **Filtration & Separation**, p. 789-793, 1995.

SCHMIDT, E.; LÖFFLER, F. The analysis of dust cake structures, **Part. & Part. System. Charact.**, v. 8, p. 105-109, 1991.

SERRANA FERTILIZANTES. Disponível em:
<<http://www.serrana.com.br/nutricaoanimal/processodeproducao.asp>>. Acesso em: 07 dez. 2009.

SEVILLE, J. P. K. **Gas cleaning in demanding applications.** Blackie Academia & Professional. School of Chemical Engineering; The University of Birmingham, UK, 1ª edição, 1997.

SILVA, C. R. N. et al. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. **Powder Technology**, v. 101, p 165-172, 1999.

SOUZA JR, A. S.. et al. Talcose pulmonar associada ao uso endovenoso de medicamentos orais: relato de caso. **Radiologia Brasileira**, v. 36, p. 187-190, 2003.

SOUZA, E. A.; CARDOSO, V. R. S. Fosfato. Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em:
<<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/fosfato.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2009.

SOUZA, E. A.; FONSECA, D. S. Fosfato. Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em:
< http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=4368>.
Acesso em: 17 jan. 2011.

STANGHELLE, D.; SLUNGAARD, T.; SØNJU, O. K. Granular bed filtration of high temperature biomass gasification gas. **Journal of Hazardous Materials**, v. 144, p. 668-672, 2007.

STRAUSS, W. **Industrial gas cleaning**, 2nd edition, Pergamon Press, New York, 1975.

SVAROVSKY, L. **Solid-gas separation**, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam–Oxford–New York, 1981.

TANABE, E. H. **Estudo do comportamento da deposição das partículas em diferentes meios filtrantes**. 2008. (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2008.

TANABE, E. H. et al., Study of the profundity of particles penetration in different fabric filters. In: World Filtration Congress, 10., 2008, Leipzig. **Proceedings...** Leipzig, Alemanha, 2008. v. III, p.III-403 a III-407.

THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. **Air pollution control equipment – particulates**, Vol. 01, CRC Press, Flórida, 1998.

TOGNETTI, E. R. **Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases**. 2007. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, 2007.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Disponível em:
< http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2009-phosp.pdf> e
< http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2010-phosp.pdf>
Acesso em: 17 jan. 2011.

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration. **Separation and Purification Technology**, v. 58, p. 234-241, 2007.

WALSH, D. C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behavior under solid particle load. **Filtration and Separation**, v.33 n.06, p. 501-506, 1996.

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T. The effect of particle size, charge and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. **Journal of Aerosol Science**, v.28, n.2, p. 307-321, 1997.

WIKIPEDIA. Talco. Disponível em: < <http://pt.wikipedia.org/wiki/Talco>>. Acesso em: 05 dez. 2009.

XU, H.; XIONG, G.; YAO, Q. Experimental study of cake detachment in cake filtration and electrostatic enhanced cake filtration. In: World Filtration Congress, 10., 2008, Leipzig. **Proceedings...** Leipzig, Alemanha, 2008. v. III, p.III-77 a III-81.

APÊNDICE A – Dados dos Ensaios de Filtração para a Rocha Fosfática.

Tabela A1 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m², correspondente à Figura 4.1.

t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	106,33717	0,00
10	132,92147	0,38
20	313,69466	0,76
30	643,3399	1,14
40	1004,88629	1,52

Tabela A2 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m², correspondente à Figura 4.1.

t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	101,02032	0,00
10	132,92147	0,37
20	303,06094	0,73
30	584,85446	1,10
40	925,13341	1,46
50	1323,89781	1,83
60	1727,97907	2,20
70	2158,64462	2,56
80	2605,26075	2,93
90	3030,60945	3,29

Tabela A3 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m², correspondente à Figura 4.1.

t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	101,02032	0,00
10	138,23833	0,40
20	340,27896	0,81
30	749,67707	1,21
40	1185,65949	1,62
50	1611,00818	2,02
60	2078,89174	2,42
70	2530,82473	2,83
80	3094,41175	3,23
90	3604,83019	3,64
100	4035,49574	4,04
110	4567,18161	4,44
120	5066,96632	4,85
130	5550,80046	5,25

Tabela A4 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m², correspondente à Figura 4.1.

t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)	t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	143,55518	0,00	160	5385,97785	7,12
10	276,47665	0,45	170	5635,87020	7,57
20	584,85446	0,89	180	5933,61429	8,01
30	994,25257	1,34	190	6188,82351	8,46
40	1339,84839	1,78	200	6396,18099	8,90
50	1733,29593	2,23	210	6608,85534	9,35
60	2121,42661	2,67	220	6842,79712	9,79
70	2525,50787	3,12	230	7082,05576	10,24
80	2881,73741	3,56	240	7257,51210	10,68
90	3269,86809	4,01	250	7480,82017	11,13
100	3572,92903	4,45	260	7635,00907	11,57
110	3939,79228	4,90	270	7821,09912	12,02
120	4216,26894	5,34	280	8081,62520	12,46
130	4529,96360	5,79	290	8134,79378	12,91
140	4833,02454	6,23	300	8326,20070	13,35
150	5146,71920	6,68	310	8496,34017	13,80

Tabela A5 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m², correspondente à Figura 4.1.

t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	127,60461	0,00
10	196,72377	0,52
20	494,46786	1,04
30	930,45027	1,56
40	1355,79896	2,08
50	1770,51394	2,61
60	2195,86264	3,13
70	2642,47876	3,65
80	3051,87688	4,17
90	3461,27500	4,69
100	3817,50453	5,21
110	4131,19920	5,73
120	4476,79501	6,25
130	4822,39082	6,77
140	5173,30350	7,29
150	5423,19585	7,82
160	5704,98937	8,34
170	5922,98057	8,86
180	6183,50665	9,38
190	6465,30016	9,90
200	6582,27105	10,42
210	6853,43084	10,94
220	6943,81744	11,46

t(s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
230	7199,02665	11,98
240	7337,26498	12,50
250	7507,40446	13,03
260	7698,81137	13,55
270	7916,80258	14,07
280	8017,82289	14,59
290	8214,54666	15,11
300	8395,31986	15,63
310	8485,70646	16,15
320	8581,40991	16,67
330	8810,03484	17,19
340	9043,97662	17,71
350	9139,68007	18,24
360	9304,50269	18,76
370	9421,47358	19,28
380	9527,81076	19,80
390	9788,33683	20,32
400	10006,32804	20,84
410	10112,66521	21,36
420	10149,88322	21,88
430	10245,58668	22,40
440	10548,64763	22,92
450	10740,05454	23,45

Tabela A6 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m², correspondente à Figura 4.2.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	47,85173	0,00
10	53,16859	0,24
20	58,48545	0,48
30	85,06974	0,71
40	159,50576	0,95
50	244,57550	1,19
60	382,81383	1,43
70	563,58702	1,67
80	739,04336	1,90
90	957,03456	2,14

Tabela A7 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m², correspondente à Figura 4.2.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	53,16859	0,00
10	53,16859	0,24
20	69,11916	0,49
30	116,97089	0,73
40	180,77320	0,97
50	303,06094	1,22
60	457,24985	1,46
70	680,55791	1,70
80	914,49969	1,94
90	1137,80776	2,19
100	1350,48211	2,43
110	1616,32504	2,67
120	1903,43541	2,92
130	2158,64462	3,16
140	2445,75499	3,40
150	2738,18222	3,65
160	3014,65887	3,89

Tabela A8 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m², correspondente à Figura 4.2.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	53,16859	0,00
10	58,48545	0,27
20	69,11916	0,54
30	122,28775	0,82
40	207,35749	1,09
50	319,01152	1,36
60	494,46786	1,63
70	707,14220	1,90
80	925,13341	2,18
90	1180,34263	2,45
100	1467,45300	2,72
110	1759,88022	2,99

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
120	2073,57489	3,26
130	2381,95269	3,54
140	2700,96421	3,81
150	2961,49029	4,08
160	3296,45238	4,35
170	3626,09762	4,62
180	3875,98998	4,90
190	4200,31836	5,17
200	4535,28046	5,44
210	4753,27166	5,71
220	5003,16402	5,98
230	5327,49240	6,26

Tabela A9 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m², correspondente à Figura 4.2.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	53,16859	0,00
10	69,11916	0,30
20	90,38660	0,59
30	159,50576	0,89
40	276,47665	1,19
50	388,13068	1,49
60	579,53760	1,78
70	845,38053	2,08
80	1089,95603	2,38
90	1355,79896	2,67
100	1653,54305	2,97
110	1961,92085	3,27
120	2291,56609	3,56
130	2605,26075	3,86
140	2945,53971	4,16
150	3222,01636	4,46
160	3535,71102	4,75
170	3875,98998	5,05
180	4195,00150	5,35
190	4423,62642	5,64
200	4721,37051	5,94
210	5024,43145	6,24
220	5263,69009	6,53
230	5566,75104	6,83
240	5784,74225	7,13
250	6125,02120	7,43
260	6380,23042	7,72
270	6693,92508	8,02
280	6922,55000	8,32
290	7119,27377	8,61
300	7374,48299	8,91
310	7677,54394	9,21
320	7964,65431	9,50
330	8273,03211	9,80

Tabela A10 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m², correspondente à Figura 4.3.

t(s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	79,75288	0,00
10	154,18890	0,65
20	489,15100	1,29
30	978,30200	1,94

Tabela A11 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m², correspondente à Figura 4.3.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	74,43602	0,00
10	138,23833	0,64
20	483,83414	1,28
30	983,61886	1,92
40	1568,47331	2,56
50	2158,64462	3,20
60	2786,03395	3,84

Tabela A12 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m², correspondente à Figura 4.3.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	69,11916	0,00
10	127,60461	0,65
20	404,08126	1,30
30	925,13341	1,94
40	1573,79017	2,59
50	2238,39750	3,24
60	2924,27227	3,89
70	3700,53364	4,54
80	4391,72527	5,18
90	5146,71920	5,83
100	5848,54455	6,48

Tabela A13 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m², correspondente à Figura 4.3.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	63,80230	0,00
10	127,60461	0,65
20	451,93299	1,31
30	1010,20315	1,96
40	1611,00818	2,62
50	2334,10096	3,27
60	3083,77803	3,92
70	3801,55396	4,58
80	4551,23103	5,23
90	5327,49240	5,89
100	6093,12005	6,54
110	6773,67796	7,19
120	7528,67189	7,85
130	8203,91295	8,50
140	8879,15400	9,16

Tabela A14 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m², correspondente à Figura 4.3.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	85,06974	0,00
10	154,18890	0,60
20	478,51728	1,19
30	983,61886	1,79
40	1600,37446	2,38
50	2174,59520	2,98
60	2796,66767	3,57
70	3455,95814	4,17
80	4109,93176	4,76
90	4742,63794	5,36
100	5423,19585	5,95
110	6125,02120	6,55
120	6784,31168	7,14
130	7464,86959	7,74
140	8049,72404	8,33
150	8756,86625	8,93
160	9331,08699	9,52
170	10006,32804	10,12
180	10538,01391	10,71

Tabela A15 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 1000 N/m², correspondente à Figura 4.4.

t(s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	58,48545	0,00
10	69,11916	0,60
20	233,94178	1,20
30	579,53760	1,80
40	1127,17404	2,40

Tabela A16 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m², correspondente à Figura 4.4.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	47,85173	0,00
10	74,43602	0,64
20	249,89236	1,28
30	563,58702	1,93
40	1020,83687	2,57
50	1552,52274	3,21
60	2169,27834	3,85
70	2754,13280	4,49

Tabela A17 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m², correspondente à Figura 4.4.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
0	63,80230	0,00
10	111,65403	0,69
20	319,01152	1,38
30	669,92419	2,07
40	1095,27289	2,76
50	1669,49363	3,45
60	2286,24923	4,13
70	2897,68798	4,82
80	3626,09762	5,51
90	4157,78349	6,20
100	4801,12339	6,89
110	5529,53303	7,58

Tabela A18 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m², correspondente à Figura 4.4.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	53,16859	0,00
10	106,33717	0,66
20	276,47665	1,31
30	574,22074	1,97
40	994,25257	2,63
50	1525,93844	3,29
60	2201,17949	3,94
70	2887,05426	4,60
80	3461,27500	5,26
90	4109,93176	5,91
100	4806,44025	6,57
110	5476,36444	7,23
120	6183,50665	7,88
130	6880,01513	8,54
140	7544,62247	9,20
150	8156,06122	9,86
160	8815,35169	10,51

Tabela A19 – Dados de filtração para a rocha fosfática, tendo como meio filtrante o acrílico e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m², correspondente à Figura 4.4.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	53,16859	0,00
10	79,75288	0,61
20	287,11037	1,21
30	643,33990	1,82
40	1169,70891	2,42
50	1759,88022	3,03
60	2355,36840	3,63
70	2977,44086	4,24
80	3642,04820	4,84
90	4301,33867	5,45

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
100	4976,57973	6,05
110	5646,50392	6,66
120	6247,30895	7,26
130	6880,01513	7,87
140	7571,20676	8,47
150	8257,08153	9,08
160	8900,42143	9,68
170	9506,54332	10,29
180	10075,44720	10,89
190	10681,56909	11,50

APÊNDICE B – Dados dos Ensaios de Filtração para o Talco.

Tabela B1 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 3000 N/m^2 , correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
0	63,80230	0,00
10	85,06974	0,52
20	138,23833	1,04
30	223,30806	1,57
40	340,27896	2,09
50	483,83414	2,61
60	638,02304	3,13
70	786,89508	3,65
80	930,45027	4,18
90	1074,00545	4,70
100	1238,82807	5,22
110	1350,48211	5,74
120	1509,98787	6,26
130	1664,17677	6,79
140	1818,36567	7,31
150	1956,60399	7,83
160	2105,47604	8,35
170	2259,66494	8,87
175	2334,10096	9,14
180	2408,53698	9,40
190	2546,77531	9,92
200	2700,96421	10,44
220	2961,49029	11,48

Tabela B2 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 6000 N/m^2 , correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
0	69,11916	0,00
10	85,06974	0,53
20	143,55518	1,06
30	233,94178	1,58
40	366,86325	2,11
50	515,73529	2,64
60	659,29048	3,17
70	808,16252	3,70
80	930,45027	4,22
90	1132,49090	4,75
100	1244,14493	5,28
110	1408,96755	5,81
120	1557,83959	6,34
130	1701,39478	6,86
140	1844,94996	7,39
150	1999,13886	7,92
160	2169,27834	8,45
170	2328,78410	8,98
175	2408,53698	9,24
180	2467,02243	9,50
190	2658,42934	10,03
200	2780,71709	10,56

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
210	2913,63856	11,09
220	3083,77804	11,62
230	3237,96694	12,14
240	3360,25469	12,67
250	3530,39416	13,20
260	3626,09762	13,73
270	3790,92024	14,26
280	3918,52485	14,78
290	4051,44632	15,31
300	4195,00150	15,84
310	4338,55668	16,37
320	4471,47815	16,90
330	4620,35019	17,42
340	4742,63794	17,95
350	4880,87627	18,48
360	5040,38203	19,01
370	5157,35292	19,54
380	5258,37324	20,06
390	5396,61156	20,59
400	5497,63188	21,12
410	5651,82078	21,65
420	5806,00968	22,18
430	5901,71314	22,70

Tabela B3 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m^2 , correspondente à Figura 4.6.

t (s)	ΔP (N/m^2)	m (g)
0	85,06974	0,00
10	111,65403	0,46
20	143,55518	0,92
30	223,30806	1,39
40	345,59581	1,85
50	494,46786	2,31
60	659,29048	2,77
70	813,47938	3,23
80	972,98514	3,70
90	1100,58975	4,16
100	1265,41237	4,62
110	1424,91813	5,08
120	1568,47331	5,54
130	1733,29593	6,01
140	1871,53426	6,47
150	2025,72316	6,93
160	2169,27834	7,39
170	2318,15039	7,85
175	2413,85384	8,09
180	2488,28986	8,32
190	2583,99332	8,78
200	2759,44966	9,24
210	2887,05426	9,70
220	3014,65887	10,16
230	3206,06579	10,63
240	3296,45238	11,09
250	3455,95814	11,55
260	3604,83019	12,01
270	3743,06851	12,47
280	3881,30684	12,94
290	4035,49574	13,40
300	4157,78349	13,86
310	4306,65553	14,32
320	4423,62642	14,78
330	4561,86475	15,25
340	4710,73679	15,71
350	4827,70768	16,17
360	4971,26287	16,63
370	5045,69889	17,09

t (s)	ΔP (N/m^2)	m (g)
380	5183,93721	17,56
390	5274,32381	18,02
400	5417,87900	18,48
410	5556,11732	18,94
420	5667,77135	19,40
430	5806,00968	19,87
440	5907,03000	20,33
450	6018,68403	20,79
460	6125,02120	21,25
470	6210,09094	21,71
480	6337,69555	22,18
490	6444,03272	22,64
500	6587,58791	23,10
510	6688,60822	23,56
520	6853,43084	24,02
530	6869,38142	24,49
540	6933,18372	24,95
550	7087,37262	25,41
560	7204,34351	25,87
570	7305,36383	26,33
580	7374,48299	26,80
590	7539,30561	27,26
600	7544,62247	27,72
610	7709,44509	28,18
620	7794,51483	28,64
630	7879,58457	29,11
640	7991,23860	29,57
650	8124,16007	30,03
655	8172,01179	30,26
660	8187,96237	30,49
665	8225,18038	30,72
670	8310,25012	30,95
675	8374,05242	31,19
680	8390,00300	31,42
685	8443,17159	31,65
690	8475,07274	31,88
695	8570,77620	32,11
700	8554,82562	32,34
710	8703,69766	32,80
720	8794,08426	33,26

Tabela B4 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m^2 , correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
0	58,48545	0,00
10	63,80230	0,52
20	127,60461	1,05
30	239,25864	1,57
40	372,18011	2,10
50	505,10157	2,62
60	643,33990	3,14
70	792,21194	3,67
80	919,81655	4,19
90	1074,00545	4,72
100	1228,19436	5,24
110	1355,79896	5,76
120	1499,35415	6,29
130	1642,90933	6,81
140	1781,14766	7,34
150	1923,45847	7,86
160	2034,88084	8,38
170	2183,75255	8,91
175	2258,18843	9,17
180	2338,04124	9,43
190	2444,10417	9,96
200	2593,10619	10,48
210	2763,40259	11,00
220	2858,89895	11,53
230	2982,75772	12,05
240	3115,67919	12,58
250	3280,50181	13,10
260	3386,83898	13,62
270	3535,71102	14,15
280	3679,26621	14,67
290	3780,28652	15,20
300	3955,74286	15,72
310	4040,81260	16,24
320	4163,10035	16,77
330	4285,38810	17,29
340	4391,72527	17,82
350	4551,23103	18,34
360	4636,30077	18,86
370	4758,58852	19,39
380	4886,19313	19,91
390	4976,57973	20,44
400	5157,35292	20,96

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
410	5183,93721	21,48
420	5343,44298	22,01
430	5508,26559	22,53
440	5588,01847	23,06
450	5678,40507	23,58
460	5816,64340	24,10
470	5917,66371	24,63
480	5986,78288	25,15
490	6119,70434	25,68
500	6210,09094	26,20
510	6284,52696	26,72
520	6422,76529	27,25
530	6523,78560	27,77
540	6608,85534	28,30
550	6693,92508	28,82
560	6768,36110	29,34
570	6885,33199	29,87
580	6975,71859	30,39
590	7082,05576	30,92
600	7135,22435	31,44
610	7284,09639	31,96
620	7369,16613	32,49
630	7464,86959	33,01
640	7549,93933	33,54
650	7688,17765	34,06
655	7720,07881	34,32
660	7783,88111	34,58
665	7789,19797	34,85
670	7831,73284	35,11
675	7868,95085	35,37
680	7879,58457	35,63
685	7900,85200	35,89
690	7954,02059	36,16
695	8033,77347	36,42
700	8118,84321	36,68
710	8219,86352	37,20
720	8304,93326	37,73
730	8443,17159	38,25
740	8485,70646	38,78
750	8576,09305	39,30
760	8645,21222	39,82
770	8698,38080	40,35

Tabela B4 (Continuação) - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 12000 N/m², correspondente à Figura 4.6.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
780	8794,08426	40,87
790	8879,15400	41,40
800	8974,85745	41,92
810	9075,87777	42,44
820	9134,36322	42,97
830	9230,06667	43,49
840	9315,13641	44,02
850	9341,72070	44,54
860	9410,83987	45,06
870	9554,39505	45,59
880	9565,02877	46,11
890	9644,78165	46,64
900	9724,53453	47,16
910	9820,23799	47,68
920	9915,94144	48,21
930	10027,59547	48,73
940	10070,13034	49,26
950	10128,61579	49,78
960	10176,46752	50,30
970	10192,41809	50,83
980	10261,53726	51,35
990	10490,16218	51,88
1000	10447,62731	52,40
1010	10468,89474	52,92
1020	10511,42961	53,45
1030	10596,49935	53,97
1040	10708,15339	54,50
1050	10798,53998	55,02
1060	10793,22312	55,54
1070	10883,60972	56,07
1080	10899,56030	56,59

Tabela B5 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m^2 e velocidade de filtração de $7,5 \text{ cm/s}$, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
0	116,97089	0,00
10	143,55518	0,38
20	196,72377	0,76
30	265,84293	1,15
40	340,27896	1,53
50	441,29927	1,91
60	537,00273	2,29
70	616,75561	2,67
80	680,55791	3,06
90	792,21194	3,44
100	903,86598	3,82
110	978,30200	4,20
120	1074,00545	4,58
130	1164,39205	4,97
140	1276,04608	5,35
150	1382,38326	5,73
160	1456,81928	6,11
170	1547,20588	6,49
180	1589,74075	6,88
190	1669,49363	7,26
200	1807,73195	7,64
210	1892,80169	8,02
220	1983,18829	8,40
230	2073,57489	8,79
240	2121,42661	9,17
250	2195,86264	9,55
260	2296,88295	9,93
270	2376,63583	10,31
280	2445,75499	10,70
290	2520,19102	11,08
300	2637,16191	11,46
310	2711,59793	11,84
320	2796,66767	12,22
330	2871,10369	12,61
340	2934,90599	12,99
350	3009,34201	13,37
360	3062,51060	13,75
370	3179,48149	14,13
380	3195,43207	14,52
390	3275,18495	14,90
400	3312,40296	15,28
410	3397,47270	15,66

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
420	3471,90872	16,04
430	3541,02788	16,43
440	3626,09762	16,81
450	3716,48422	17,19
460	3796,23710	17,57
470	3913,20799	17,95
480	3950,42600	18,34
490	3992,96087	18,72
500	4136,51605	19,10
510	4226,90265	19,48
520	4311,97239	19,86
530	4397,04213	20,25
540	4434,26014	20,63
550	4540,59731	21,01
560	4599,08276	21,39
570	4726,68737	21,77
580	4817,07397	22,16
590	4833,02454	22,54
600	5003,16402	22,92
610	5061,64947	23,30
620	5077,60004	23,68
630	5157,35292	24,07
640	5242,42266	24,45
650	5274,32381	24,83
660	5322,17554	25,21
670	5423,19586	25,59
680	5497,63188	25,98
690	5550,80046	26,36
700	5635,87020	26,74
710	5678,40507	27,12
720	5763,47481	27,50
730	5816,64340	27,89
740	5859,17827	28,27
750	5891,07942	28,65
760	5992,09973	29,03
770	6039,95146	29,41
780	6183,50665	29,80
790	6257,94267	30,18
800	6295,16068	30,56
810	6380,23042	30,94
820	6438,71586	31,32
830	6513,15189	31,71

Tabela B5 (Continuação) - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m² e velocidade de filtração de 7,5 cm/s, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ΔP (N/m²)	m (g)
840	6603,53848	32,09
850	6608,85534	32,47
860	6624,80592	32,85
870	6837,48026	33,23
880	6784,31168	33,62
890	6869,38142	34,00
900	6890,64885	34,38
910	6959,76801	34,76
920	7108,64006	35,14
930	7161,80864	35,53
940	7262,82896	35,91
950	7347,89870	36,29
960	7321,31440	36,67
970	7432,96844	37,05
980	7443,60215	37,44
990	7464,86959	37,82
1000	7597,79106	38,20
1010	7677,54394	38,58
1020	7709,44509	38,96
1030	7741,34624	39,35
1040	7789,19797	39,73
1050	7943,38687	40,11
1060	7954,02059	40,49
1070	8028,45661	40,87
1080	8049,72404	41,26
1090	8086,94206	41,64
1100	8065,67462	42,02
1110	8198,59609	42,40
1120	8251,76467	42,78
1130	8299,61640	43,17
1140	8443,17159	43,55
1150	8459,12216	43,93
1160	8506,97389	44,31
1170	8501,65703	44,69
1180	8634,57850	45,08
1190	8719,64824	45,46
1200	8724,96510	45,84
1210	8645,21222	46,22

Tabela B6 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m^2 e velocidade de filtração de $10,0 \text{ cm/s}$, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
0	85,06974	0,00
10	111,65403	0,46
20	143,55518	0,92
30	223,30806	1,39
40	345,59581	1,85
50	494,46786	2,31
60	659,29048	2,77
70	813,47938	3,23
80	972,98514	3,70
90	1100,58975	4,16
100	1265,41237	4,62
110	1424,91813	5,08
120	1568,47331	5,54
130	1733,29593	6,01
140	1871,53426	6,47
150	2025,72316	6,93
160	2169,27834	7,39
170	2318,15039	7,85
175	2413,85384	8,09
180	2488,28986	8,32
190	2583,99332	8,78
200	2759,44966	9,24
210	2887,05426	9,70
220	3014,65887	10,16
230	3206,06579	10,63
240	3296,45238	11,09
250	3455,95814	11,55
260	3604,83019	12,01
270	3743,06851	12,47
280	3881,30684	12,94
290	4035,49574	13,40
300	4157,78349	13,86
310	4306,65553	14,32
320	4423,62642	14,78
330	4561,86475	15,25
340	4710,73679	15,71
350	4827,70768	16,17
360	4971,26287	16,63
370	5045,69889	17,09

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}$	m (g)
380	5183,93721	17,56
390	5274,32381	18,02
400	5417,87900	18,48
410	5556,11732	18,94
420	5667,77135	19,40
430	5806,00968	19,87
440	5907,03000	20,33
450	6018,68403	20,79
460	6125,02120	21,25
470	6210,09094	21,71
480	6337,69555	22,18
490	6444,03272	22,64
500	6587,58791	23,10
510	6688,60822	23,56
520	6853,43084	24,02
530	6869,38142	24,49
540	6933,18372	24,95
550	7087,37262	25,41
560	7204,34351	25,87
570	7305,36383	26,33
580	7374,48299	26,80
590	7539,30561	27,26
600	7544,62247	27,72
610	7709,44509	28,18
620	7794,51483	28,64
630	7879,58457	29,11
640	7991,23860	29,57
650	8124,16007	30,03
655	8172,01179	30,26
660	8187,96237	30,49
665	8225,18038	30,72
670	8310,25012	30,95
675	8374,05242	31,19
680	8390,00300	31,42
685	8443,17159	31,65
690	8475,07274	31,88
695	8570,77620	32,11
700	8554,82562	32,34
710	8703,69766	32,80
720	8794,08426	33,26

Tabela B7 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m² e velocidade de filtração de 12,5 cm/s, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	143,55518	0,00
10	202,04063	0,49
20	308,37780	0,98
30	510,41843	1,47
40	712,45906	1,96
50	988,93571	2,46
60	1265,41237	2,95
70	1536,57216	3,44
80	1813,04881	3,93
90	2068,25803	4,42
100	2350,05154	4,91
110	2626,52819	5,40
120	2940,22285	5,89
130	3227,33322	6,38
140	3514,44359	6,87
150	3790,92024	7,37
160	4046,12946	7,86
170	4322,60611	8,35
180	4572,49847	8,84
190	4833,02454	9,33
200	5146,71920	9,82
210	5407,24528	10,31
220	5678,40507	10,80
230	5922,98057	11,29
240	6167,55607	11,78
250	6422,76529	12,28
260	6672,65765	12,77
270	6933,18372	13,26
280	7145,85807	13,75
290	7417,01786	14,24
300	7656,27650	14,73
310	7879,58457	15,22
320	8134,79378	15,71
330	8304,93326	16,20
340	8581,40991	16,69
350	8815,35169	17,19

Tabela B8 - Dados de filtração para o talco, tendo como meio filtrante o poliéster e queda de pressão máxima de aproximadamente 9000 N/m² e velocidade de filtração de 15,0 cm/s, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ΔP (N/m ²)	m (g)
0	303,06094	0,00
10	334,96210	0,41
20	510,41843	0,81
30	850,69739	1,22
40	1318,58095	1,63
50	1844,94996	2,04
60	2360,68525	2,44
70	2796,66767	2,85
80	3280,50181	3,26
90	3684,58307	3,66
100	4125,88234	4,07
110	4529,96360	4,48
120	4939,36172	4,88
130	5343,44298	5,29
140	5715,62308	5,70
150	6156,92235	6,11
160	6491,88445	6,51
170	6858,74770	6,92
180	7167,12550	7,33
190	7480,82017	7,73
200	7858,31713	8,14
210	8166,69494	8,55
220	8437,85473	8,95
230	8730,28196	9,36

APÊNDICE C – Dados de Porosidade Estimada por Equações da Literatura para a Rocha Fosfática.

Tabela C1 - Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.1.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$				
	1000	3000	6000	9000	12000
	ϵ				
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,52708	0,52228	0,52988	0,45598	0,51731
20	0,50606	0,50568	0,50356	0,44940	0,48867
30	0,46751	0,47451	0,45654	0,43477	0,46103
40	0,44866	0,45399	0,43651	0,43355	0,45057
50	0,52708	0,43813	0,42691	0,42960	0,44548
60	0,50606	0,42846	0,41869	0,42737	0,44165
70	0,46751	0,42069	0,41392	0,42504	0,43787
80	0,44866	0,41457	0,40646	0,42524	0,43669
90		0,41084	0,40257	0,42425	0,43575
100			0,40178	0,42616	0,43660
110			0,39865	0,42587	0,43855
120			0,39680	0,42806	0,43935
130			0,39562	0,42902	0,43998
140				0,43008	0,44048
150				0,43079	0,44291
160				0,43298	0,44456
170				0,43474	0,44732
180				0,43532	0,44896
190				0,43680	0,45011
200				0,43890	0,45406
210				0,44077	0,45500
220				0,44212	0,45900
230				0,44331	0,46001
240				0,44541	0,46286
250				0,44665	0,46496
260				0,44887	0,46666
270				0,45049	0,46783
280				0,45093	0,47068
290				0,45429	0,47199
300				0,45555	0,47352
310				0,45704	0,47619
320					0,48013
330					0,48250
340					0,48289
350					0,48323
360					0,48540
370					0,48659
380					0,48832
390					0,49011
400					0,48994

Tabela C2 - Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.1.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$				
	1000	3000	6000	9000	12000
	ϵ				
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,55076	0,54588	0,55364	0,47807	0,54189
20	0,52934	0,52895	0,52676	0,47158	0,51159
30	0,48988	0,49706	0,47860	0,45621	0,48337
40	0,47051	0,47599	0,45799	0,45486	0,47228
50	0,55076	0,45967	0,44812	0,45088	0,46689
60	0,52934	0,44970	0,43963	0,44861	0,46257
70	0,48988	0,44169	0,43470	0,44616	0,45944
80	0,47051	0,43536	0,42695	0,44635	0,45820
90		0,43151	0,42299	0,44537	0,45725
100			0,42214	0,44728	0,45810
110			0,41893	0,44705	0,46010
120			0,41703	0,44931	0,46090
130			0,41578	0,45028	0,46155
140				0,45143	0,46189
150				0,45210	0,46399
160				0,45437	0,46585
170				0,45618	0,46897
180				0,45683	0,47059
190				0,45827	0,47189
200				0,46045	0,47583
210				0,46237	0,47705
220				0,46380	0,48133
230				0,46499	0,48227
240				0,46708	0,48519
250				0,46835	0,48743
260				0,47067	0,48925
270				0,47245	0,49050
280				0,47281	0,49329
290				0,47635	0,49469
300				0,47759	0,49631
310				0,47912	0,49916
320					0,50335
330					0,50523
340					0,50566
350					0,50600
360					0,50821
370					0,50942
380					0,51124
390					0,51311
400					0,51286

Tabela C3 - Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.3.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$				
	1000	3000	6000	9000	12000
	ϵ				
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,57691	0,59015	0,60249	0,60370	0,56606
20	0,51698	0,51719	0,54190	0,52866	0,50935
30	0,48107	0,47926	0,48834	0,47865	0,47039
40		0,45767	0,45874	0,45705	0,44666
50		0,44629	0,44356	0,43969	0,43694
60		0,43780	0,43364	0,42860	0,42897
70			0,42433	0,42234	0,42242
80			0,42020	0,41710	0,41793
90			0,41551	0,41266	0,41509
100			0,41298	0,40944	0,41188
110				0,40827	0,40895
120				0,40621	0,40726
130				0,40556	0,40555
140				0,40502	0,40540
150					0,40373
160					0,40384
170					0,40283
180					0,40342

Tabela C4 - Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.3.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$				
	1000	3000	6000	9000	12000
	ϵ				
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,60126	0,61461	0,62700	0,62823	0,59030
20	0,54048	0,54069	0,56583	0,55237	0,53269
30	0,50378	0,50193	0,51120	0,50129	0,49283
40		0,47976	0,48087	0,47914	0,46845
50		0,46807	0,46520	0,46128	0,45844
60		0,45933	0,45504	0,44985	0,45023
70			0,44546	0,44339	0,44348
80			0,44105	0,43798	0,43885
90			0,43631	0,43339	0,43590
100			0,43372	0,43007	0,43259
110				0,42886	0,42956
120				0,42673	0,42782
130				0,42606	0,42605
140				0,42550	0,42589
150					0,42417
160					0,42428
170					0,42323
180					0,42385

Tabela C5 - Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.2.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	1000	3000	6000	9000
	ϵ			
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,58568	0,58842	0,59075	0,58025
20	0,66560	0,64603	0,66112	0,63698
30	0,66970	0,62985	0,63904	0,61521
40	0,62408	0,61010	0,60685	0,58025
50	0,59677	0,57105	0,57920	0,56493
60	0,56160	0,54115	0,54562	0,53644
70	0,53137	0,50996	0,51941	0,50793
80	0,51382	0,48973	0,50235	0,49290
90	0,49616	0,47737	0,48673	0,48044
100		0,46938	0,47294	0,46917
110		0,45923	0,46254	0,46003
120		0,45015	0,45334	0,45196
130		0,44473	0,44646	0,44627
140		0,43884	0,44042	0,44059
150		0,43374	0,43773	0,43824
160		0,43019	0,43283	0,43487
170			0,42886	0,43129
180			0,42778	0,42878
190			0,42470	0,42889
200			0,42189	0,42732
210			0,42211	0,42577
220			0,42157	0,42578
230			0,41949	0,42441
240				0,42496
250				0,42310
260				0,42291
270				0,42170
280				0,42207
290				0,42283
300				0,42271
310				0,42195
320				0,42130
330				0,42049

Tabela C6 - Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.2.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	1000	3000	6000	9000
	ϵ			
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,61011	0,61289	0,61519	0,60465
20	0,68998	0,67059	0,68552	0,66153
30	0,69403	0,65446	0,66358	0,63977
40	0,64866	0,63466	0,63141	0,60465
50	0,62127	0,59538	0,60358	0,58920
60	0,58582	0,56506	0,56962	0,56029
70	0,55513	0,53336	0,54297	0,53123
80	0,53725	0,51268	0,52550	0,51586
90	0,51921	0,50012	0,50956	0,50319
100		0,49186	0,49549	0,49154
110		0,48136	0,48468	0,48221
120		0,47207	0,47541	0,47387
130		0,46653	0,46797	0,46804
140		0,46040	0,46195	0,46224
150		0,45514	0,45926	0,45969
160		0,45132	0,45422	0,45635
170			0,45013	0,45261
180			0,44895	0,45003
190			0,44598	0,45016
200			0,44284	0,44853
210			0,44316	0,44690
220			0,44263	0,44690
230			0,44046	0,44558
240				0,44607
250				0,44415
260				0,44398
270				0,44278
280				0,44310
290				0,44392
300				0,44381
310				0,44287
320				0,44227
330				0,44142

Tabela C7 - Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.4.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{\text{máx}}$				
	1000	3000	6000	9000	12000
	ϵ				
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,67419	0,67333	0,62855	0,62872	0,65620
20	0,60381	0,60404	0,58095	0,59364	0,57769
30	0,53775	0,55015	0,53689	0,55072	0,52538
40	0,48995	0,51081	0,51084	0,51707	0,48640
50		0,48632	0,48608	0,49131	0,46385
60		0,46776	0,46995	0,46879	0,45086
70		0,45763	0,46001	0,45477	0,44146
80			0,44923	0,44911	0,43359
90			0,44699	0,44279	0,42801
100			0,44249	0,43684	0,42341
110			0,43715	0,43278	0,41990
120				0,42883	0,41832
130				0,42579	0,41647
140				0,42373	0,41405
150				0,42272	0,41207
160				0,42122	0,41090
170					0,41032
180					0,41022
190					0,40973

Tabela C8 - Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para a rocha fosfática tendo como meio filtrante o acrílico, correspondente à Figura 4.4.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{\text{máx}}$				
	1000	3000	6000	9000	12000
	ϵ				
0	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000	1,00000
10	0,69848	0,69764	0,65311	0,65327	0,68066
20	0,62835	0,62857	0,60534	0,61814	0,60205
30	0,56161	0,57419	0,56073	0,57475	0,54904
40	0,51287	0,53418	0,53421	0,54056	0,50927
50		0,50916	0,50886	0,51424	0,48613
60		0,49014	0,49241	0,49122	0,47278
70		0,47973	0,48218	0,47680	0,46309
80			0,47110	0,47099	0,45502
90			0,46879	0,46437	0,44923
100			0,46417	0,45834	0,44449
110			0,45867	0,45418	0,44085
120				0,45010	0,43922
130				0,44695	0,43728
140				0,44484	0,43485
150				0,44376	0,43279
160				0,44221	0,43157
170					0,43100
180					0,43086
190					0,43041

Tabela C9 – Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	3000	6000	9000	12000
	ϵ			
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,83282	0,83401	0,78908	0,86169
20	0,85371	0,85115	0,83777	0,86169
30	0,84644	0,84293	0,83401	0,83988
40	0,83282	0,82608	0,81812	0,82374
50	0,81908	0,81333	0,80308	0,81479
60	0,80866	0,80626	0,79095	0,80816
70	0,80239	0,80066	0,78437	0,80206
80	0,79850	0,79980	0,77896	0,80026
90	0,79555	0,79074	0,77831	0,79599
100	0,79120	0,79201	0,77421	0,79265
110	0,79225	0,78863	0,77138	0,79224
120	0,78938	0,78704	0,77029	0,79065
130	0,78736	0,78611	0,76788	0,78932
140	0,78566	0,78529	0,76756	0,78854
150	0,78515	0,78399	0,76632	0,78762
160	0,78411	0,78184	0,76584	0,78858
170	0,78292	0,78070	0,76513	0,78741
180	0,78252	0,78064	0,76346	0,78610
190	0,78214	0,77819	0,76546	0,78724
200	0,78193	0,77893	0,76370	0,78632
210	0,78104	0,77918	0,76414	0,78457
220	0,78024	0,77804	0,76454	0,78605
230		0,77744	0,76244	0,78629
240		0,77810	0,76425	0,78617
250		0,77707	0,76346	0,78490
260		0,77856	0,76310	0,78576
270		0,77777	0,76311	0,78514
280		0,77815	0,76312	0,78474
290		0,77836	0,76265	0,78568
300		0,77825	0,76315	0,78433
310		0,77814	0,76285	0,78569
320		0,77839	0,76346	0,78592
330		0,77810	0,76346	0,78613
340		0,77857	0,76318	0,78676
350		0,77862	0,76373	0,78597
360		0,77810	0,76359	0,78711
370		0,77863	0,76513	0,78727
380		0,77950	0,76508	0,78729
390		0,77950	0,76614	0,78819
400		0,78031	0,76596	0,78697
410		0,77996	0,76590	0,78927
420		0,77965	0,76641	0,78854

Tabela C9 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	3000	6000	9000	12000
ϵ				
430		0,78045	0,76634	0,78774
440			0,76704	0,78875
450			0,76750	0,78950
460			0,76804	0,78926
470			0,76898	0,78976
480			0,76907	0,79086
490			0,76955	0,79070
500			0,76933	0,79135
510			0,76988	0,79227
520			0,76929	0,79200
530			0,77131	0,79240
540			0,77246	0,79306
550			0,77202	0,79371
560			0,77221	0,79452
570			0,77267	0,79458
580			0,77363	0,79508
590			0,77303	0,79531
600			0,77497	0,79639
610			0,77436	0,79591
620			0,77499	0,79645
630			0,77561	0,79681
640			0,77581	0,79731
650			0,77570	0,79701
660			0,77659	0,79734
670			0,77661	0,79837
680			0,77725	0,79937
690			0,77779	0,79996
700			0,77839	0,79926
710			0,77802	0,79947
720			0,77846	0,79989
730				0,79958
740				0,80056
750				0,80089
760				0,80148
770				0,80227
780				0,80249
790				0,80285
800				0,80306
810				0,80320
820				0,80386
830				0,80405
840				0,80437
850				0,80539
860				0,80587
870				0,80547

Tabela C9 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equação de Ergun para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	3000	6000	9000	12000
	ϵ			
880				0,80663
890				0,80697
900				0,80730
910				0,80744
920				0,80758
930				0,80754
940				0,80826
950				0,80880
960				0,80944
970				0,81042
980				0,81081
990				0,80949
1000				0,81106
1010				0,81194
1020				0,81258
1030				0,81277
1040				0,81268
1050				0,81281

Tabela C10 – Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	3000	6000	9000	12000
	ϵ			
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,85123	0,85235	0,80993	0,87804
20	0,87068	0,86831	0,85586	0,87804
30	0,86393	0,86066	0,85235	0,85785
40	0,85123	0,84493	0,83744	0,84272
50	0,83834	0,83292	0,82323	0,83429
60	0,82851	0,82625	0,81171	0,82804
70	0,82258	0,82093	0,80544	0,82226
80	0,81889	0,82013	0,80027	0,82055
90	0,81608	0,81148	0,79964	0,81650
100	0,81195	0,81275	0,79571	0,81333
110	0,81295	0,80951	0,79300	0,81294
120	0,81021	0,80800	0,79196	0,81142
130	0,80829	0,80709	0,78964	0,81015
140	0,80666	0,80631	0,78933	0,80941
150	0,80618	0,80505	0,78814	0,80853
160	0,80519	0,80310	0,78768	0,80945
170	0,80405	0,80193	0,78700	0,80833
180	0,80330	0,80187	0,78539	0,80708

Tabela C10 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}_{\text{máx}}$			
	3000	6000	9000	12000
	ϵ			
190	0,80310	0,79951	0,78731	0,80817
200	0,80225	0,80024	0,78562	0,80729
210	0,80148	0,80047	0,78604	0,80562
220	0,80262	0,79930	0,78643	0,80703
230		0,79881	0,78441	0,80727
240		0,79944	0,78615	0,80715
250		0,79845	0,78539	0,80594
260		0,79988	0,78504	0,80676
270		0,79910	0,78506	0,80617
280		0,79949	0,78507	0,80578
290		0,79969	0,78461	0,80668
300		0,79958	0,78509	0,80539
310		0,79948	0,78481	0,80669
320		0,79967	0,78539	0,80690
330		0,79944	0,78539	0,80711
340		0,79987	0,78513	0,80771
350		0,79989	0,78565	0,80696
360		0,79944	0,78552	0,80805
370		0,79995	0,78700	0,80820
380		0,80077	0,78695	0,80822
390		0,80078	0,78797	0,80907
400		0,80156	0,78779	0,80792
410		0,80121	0,78773	0,81010
420		0,80089	0,78823	0,80941
430		0,80355	0,78816	0,80865
440			0,78883	0,80961
450			0,78927	0,81032
460			0,78979	0,81009
470			0,79070	0,81056
480			0,79078	0,81162
490			0,79124	0,81147
500			0,79103	0,81209
510			0,79156	0,81296
520			0,79099	0,81270
530			0,79294	0,81308
540			0,79403	0,81372
550			0,79361	0,81433
560			0,79380	0,81510
570			0,79424	0,81516
580			0,79516	0,81564
590			0,79458	0,81585
600			0,79644	0,81688
610			0,79586	0,81642

Tabela C10 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equação de MacDonald para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	ΔP (N/m ²) _{máx}			
	3000	6000	9000	12000
ϵ				
620			0,79647	0,81693
630			0,79706	0,81727
640			0,79725	0,81776
650			0,79714	0,81747
660			0,79799	0,81779
670			0,79802	0,81876
680			0,79862	0,81971
690			0,79914	0,82027
700			0,79971	0,81961
710			0,79936	0,81981
720			0,79978	0,82020
730			0,80074	0,81991
740				0,82084
750				0,82115
760				0,82171
770				0,82246
780				0,82267
790				0,82301
800				0,82321
810				0,82334
820				0,82397
830				0,82415
840				0,82445
850				0,82541
860				0,82587
870				0,82549
880				0,82659
890				0,82691
900				0,82722
910				0,82736
920				0,82749
930				0,82745
940				0,82813
950				0,82864
960				0,82925
970				0,83018
980				0,83055
990				0,82929
1000				0,83078
1010				0,83161
1020				0,83222
1030				0,83239
1040				0,83231
1050				0,83243

Tabela C11 – Porosidade estimada pela Equação de Endo para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P (N/m^2)_{m\acute{a}x}$			
	3000	6000	9000	12000
	ϵ			
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,61215	0,61348	0,56000	0,83625
20	0,63996	0,63627	0,61860	0,83625
30	0,63003	0,62514	0,61367	0,81236
40	0,61215	0,60344	0,59371	0,79490
50	0,59496	0,58784	0,57589	0,78530
60	0,58241	0,57949	0,56201	0,77822
70	0,57508	0,57289	0,55468	0,77172
80	0,57059	0,57193	0,54882	0,76981
90	0,56719	0,56147	0,54805	0,76528
100	0,56229	0,56310	0,54359	0,76175
110	0,56350	0,55923	0,54069	0,76131
120	0,56026	0,55754	0,53943	0,75963
130	0,55797	0,55640	0,53683	0,75823
140	0,55605	0,55544	0,53644	0,75740
150	0,55555	0,55401	0,53516	0,75643
160	0,55436	0,55180	0,53469	0,75745
170	0,55310	0,55043	0,53391	0,75621
180	0,55225	0,55345	0,53252	0,75483
190	0,55196	0,55744	0,53217	0,75603
200	0,55100	0,55445	0,53432	0,75506
210	0,55009	0,55486	0,53240	0,75322
220	0,55142	0,55485	0,53288	0,75477
230		0,55325	0,53330	0,75503
240		0,55243	0,53129	0,75490
250		0,55289	0,53306	0,75356
260		0,55165	0,53217	0,75448
270		0,55303	0,53172	0,75382
280		0,55198	0,53172	0,75339
290		0,55233	0,53188	0,75439
300		0,55228	0,53121	0,75296
310		0,55209	0,53192	0,75439
320		0,55180	0,53145	0,75464
330		0,55186	0,53217	0,75486
340		0,55149	0,53217	0,75552
350		0,55187	0,53188	0,75469
360		0,55180	0,53252	0,75589
370		0,55115	0,53229	0,75606
380		0,55164	0,53400	0,75609
390		0,55251	0,53380	0,75703
400		0,55243	0,53499	0,75575
410		0,55326	0,53475	0,75817
420		0,55274	0,53470	0,75740

Tabela C11 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equação de Endo para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}_{\text{máx}}$			
	3000	6000	9000	12000
ϵ				
430		0,55242	0,53520	0,75655
440			0,53624	0,75762
450			0,53639	0,75841
460			0,53705	0,75816
470			0,53800	0,75869
480			0,53805	0,75985
490			0,53860	0,75969
500			0,53837	0,76037
510			0,53930	0,76134
520			0,53814	0,76105
530			0,54048	0,76148
540			0,54143	0,76218
550			0,54127	0,76287
560			0,54137	0,76372
570			0,54197	0,76379
580			0,54305	0,76432
590			0,54235	0,76456
600			0,54449	0,76570
610			0,54353	0,76520
620			0,54428	0,76577
630			0,54511	0,76614
640			0,54543	0,76668
650			0,54525	0,76635
660			0,54649	0,76671
670			0,54652	0,76780
680			0,54717	0,76886
690			0,54700	0,76949
700			0,54772	0,76875
710			0,54790	0,76897
720			0,54776	0,76941
730				0,76909
740				0,77013
750				0,77047
760				0,77110
770				0,77194
780				0,77218
790				0,77256
800				0,77278
810				0,77293
820				0,77364
830				0,77384
840				0,77418
850				0,77526
860				0,77578

Tabela C11 (*Continuação*) – Porosidade estimada pela Equação de Endo para diferentes quedas de pressão máximas para o talco a velocidade constante de 10 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.6.

t (s)	$\Delta P \text{ (N/m}^2\text{)}_{\text{máx}}$			
	3000	6000	9000	12000
ε				
870				0,77535
880				0,77659
890				0,77695
900				0,77730
910				0,77745
920				0,77759
930				0,77755
940				0,77832
950				0,77889
960				0,77959
970				0,78063
980				0,78104
990				0,77963
1000				0,78131
1010				0,78225
1020				0,78294
1030				0,78314
1040				0,78304
1050				0,78318

Tabela C12 – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 7,5 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
0	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,70250	0,72140	0,66337
20	0,75034	0,76890	0,71337
30	0,75934	0,78144	0,72685
40	0,76439	0,78628	0,73209
50	0,75983	0,78192	0,72737
60	0,75814	0,78026	0,72558
70	0,76004	0,78213	0,72757
80	0,76439	0,78628	0,73209
90	0,76019	0,78224	0,72773
100	0,75693	0,77909	0,72431
110	0,75889	0,78101	0,72639
120	0,75814	0,78026	0,72558
130	0,75803	0,78017	0,72548
140	0,75586	0,77807	0,72323
150	0,75446	0,77677	0,72181
160	0,75601	0,77821	0,72336
170	0,75608	0,77826	0,72341

Tabela C12 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 7,5 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
180	0,75975	0,78184	0,72729
190	0,76040	0,78246	0,72794
200	0,75693	0,77909	0,72431
210	0,75726	0,77941	0,72467
220	0,75725	0,77941	0,72465
230	0,75726	0,77939	0,72464
240	0,75967	0,78174	0,72718
250	0,76046	0,78249	0,72800
260	0,75972	0,78181	0,72725
270	0,76019	0,78224	0,72773
280	0,76112	0,78315	0,72869
290	0,76180	0,78376	0,72935
300	0,76035	0,78240	0,72790
310	0,76092	0,78299	0,72853
320	0,76107	0,78309	0,72863
330	0,76163	0,78363	0,72922
340	0,76257	0,78455	0,73021
350	0,76307	0,78501	0,73072
360	0,76439	0,78628	0,73209
370	0,76314	0,78509	0,73079
380	0,76578	0,78764	0,73356
390	0,76598	0,78779	0,73373
400	0,76767	0,78943	0,73551
410	0,76759	0,78935	0,73543
420	0,76792	0,78964	0,73573
430	0,76834	0,79009	0,73622
440	0,76823	0,78999	0,73614
450	0,76792	0,78975	0,73584
460	0,76807	0,78984	0,73595
470	0,76703	0,78880	0,73483
480	0,76841	0,79016	0,73630
490	0,76960	0,79131	0,73756
500	0,76779	0,78954	0,73564
510	0,76757	0,78934	0,73541
520	0,76750	0,78928	0,73535
530	0,76748	0,78922	0,73528
540	0,76868	0,79042	0,73659
550	0,76808	0,78979	0,73590
560	0,76864	0,79040	0,73656
570	0,76751	0,78928	0,73535
580	0,76733	0,78910	0,73514
590	0,76896	0,79072	0,73690

Tabela C12 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 7,5 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
600	0,76683	0,78863	0,73463
610	0,76746	0,78920	0,73526
620	0,76902	0,79072	0,73692
630	0,76906	0,79078	0,73698
640	0,76898	0,79072	0,73689
650	0,77012	0,79181	0,73810
660	0,77086	0,79253	0,73888
670	0,77042	0,79210	0,73841
680	0,77059	0,79223	0,73856
690	0,77118	0,79281	0,73918
700	0,77109	0,79271	0,73908
710	0,77189	0,79349	0,73994
720	0,77177	0,79339	0,73982
730	0,77233	0,79393	0,74040
740	0,77312	0,79465	0,74120
750	0,77408	0,79557	0,74222
760	0,77362	0,79516	0,74171
770	0,77424	0,79574	0,74239
780	0,77295	0,79451	0,74104
790	0,77303	0,79460	0,74116
800	0,77382	0,79537	0,74198
810	0,77373	0,79526	0,74186
820	0,77404	0,79562	0,74221
830	0,77417	0,79570	0,74226
840	0,77396	0,79548	0,74234
850	0,77529	0,79675	0,74210
860	0,77640	0,79782	0,74350
870	0,77400	0,79551	0,74468
880	0,77631	0,79773	0,74213
890	0,77618	0,79759	0,74457
900	0,77715	0,79852	0,74441
910	0,77726	0,79864	0,74544
920	0,77604	0,79747	0,74558
930	0,77649	0,79786	0,74428
940	0,77604	0,79747	0,74472
950	0,77593	0,79736	0,74428
960	0,77761	0,79897	0,74415
970	0,77701	0,79843	0,74593
980	0,77812	0,79943	0,74533
990	0,77897	0,80027	0,74644
1000	0,77808	0,79940	0,74640
1010	0,77799	0,79935	0,74634
1020	0,77868	0,80001	0,74706

Tabela C12 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 7,5 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
1030	0,77937	0,80064	0,74778
1040	0,77977	0,80104	0,74820
1050	0,77857	0,79989	0,74694
1060	0,77955	0,80083	0,74796
1070	0,77957	0,80083	0,74797
1080	0,78035	0,80159	0,74879
1090	0,78094	0,80212	0,74938
1100	0,78232	0,80345	0,75085
1110	0,78146	0,80262	0,74994
1120	0,78170	0,80291	0,75025
1130	0,78212	0,80325	0,75063
1140	0,78111	0,80233	0,74960
1150	0,78192	0,80310	0,75045
1160	0,78224	0,80343	0,75082
1170	0,78338	0,80447	0,75198
1180	0,78251	0,80369	0,75111
1190	0,78240	0,80353	0,75094
1200	0,78331	0,80442	0,75190
1210	0,78544	0,80640	0,75410

Tabela C13 – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 10,0 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
0	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,78909	0,80987	0,55991
20	0,83777	0,85550	0,61855
30	0,83403	0,85241	0,61368
40	0,81812	0,83745	0,59379
50	0,80306	0,82328	0,57588
60	0,79097	0,81173	0,56200
70	0,78438	0,80538	0,55467
80	0,77897	0,80026	0,54873
90	0,77832	0,79965	0,54802
100	0,77421	0,79573	0,54357
110	0,77139	0,79314	0,54055
120	0,77029	0,79236	0,53939
130	0,76789	0,78960	0,53682
140	0,76756	0,78931	0,53648
150	0,76632	0,78807	0,53517
160	0,76584	0,78764	0,53466
170	0,76513	0,78714	0,53393

Tabela C13 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m^2 para o talco a velocidade $10,0 \text{ cm/s}$ tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ϵ		
	Ergun	MacDonald	Endo
180	0,76346	0,78544	0,53216
190	0,76548	0,78730	0,53426
200	0,76371	0,78571	0,53241
210	0,76414	0,78645	0,53287
220	0,76455	0,78654	0,53329
230	0,76244	0,78443	0,53109
240	0,76427	0,78616	0,53298
250	0,76346	0,78544	0,53216
260	0,76310	0,78499	0,53179
270	0,76311	0,78507	0,53180
280	0,76312	0,78507	0,53181
290	0,76265	0,78444	0,53132
300	0,76315	0,78502	0,53183
310	0,76286	0,78489	0,53152
320	0,76346	0,78544	0,53216
330	0,76347	0,78544	0,53216
340	0,76318	0,78510	0,53187
350	0,76374	0,78566	0,53244
360	0,76360	0,78552	0,53230
370	0,76513	0,78699	0,53391
380	0,76509	0,78709	0,53386
390	0,76615	0,78789	0,53499
400	0,76597	0,78781	0,53478
410	0,76591	0,78767	0,53472
420	0,76643	0,78814	0,53527
430	0,76634	0,78816	0,53520
440	0,76705	0,78880	0,53593
450	0,76750	0,78929	0,53642
460	0,76805	0,78978	0,53700
470	0,76899	0,79068	0,53799
480	0,76908	0,79082	0,53809
490	0,76956	0,79139	0,53859
500	0,76934	0,79106	0,53836
510	0,76989	0,79146	0,53895
520	0,76930	0,79101	0,53832
530	0,77130	0,79291	0,54048
540	0,77247	0,79400	0,54171
550	0,77203	0,79343	0,54123
560	0,77223	0,79382	0,54145

Tabela C13 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m^2 para o talco a velocidade $10,0 \text{ cm/s}$ tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ϵ		
	Ergun	MacDonald	Endo
570	0,77269	0,79428	0,54193
580	0,77365	0,79515	0,54296
590	0,77303	0,79453	0,54231
600	0,77497	0,79668	0,54441
610	0,77437	0,79576	0,54374
620	0,77500	0,79653	0,54443
630	0,77562	0,79706	0,54509
640	0,77583	0,79708	0,54532
650	0,77570	0,79715	0,54519
660	0,77660	0,79800	0,54616
670	0,77663	0,79823	0,54619
680	0,77726	0,79866	0,54687
690	0,77779	0,79903	0,54745
700	0,77840	0,79969	0,54811
710	0,77803	0,79931	0,54770
720	0,77847	0,79978	0,54818

Tabela C14 – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m^2 para o talco a velocidade $12,5 \text{ cm/s}$ tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ϵ		
	Ergun	MacDonald	Endo
0	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,75308	0,77403	0,51994
20	0,78457	0,80560	0,55483
30	0,77335	0,79434	0,54202
40	0,76821	0,78901	0,53610
50	0,75546	0,77659	0,52266
60	0,74825	0,76883	0,51449
70	0,74123	0,76395	0,50943
80	0,73759	0,76002	0,50541
90	0,73600	0,75831	0,50367
100	0,73345	0,75553	0,50086
110	0,73161	0,75356	0,49887
120	0,72864	0,75034	0,49566
130	0,72710	0,74870	0,49402
140	0,72580	0,74730	0,49264
150	0,72502	0,74646	0,49181
160	0,72494	0,74638	0,49173
170	0,72291	0,74569	0,49106
180	0,72302	0,74581	0,49117
190	0,72239	0,74564	0,49101
200	0,72099	0,74418	0,48957

Tabela C14 (Continuação) – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 12,5 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
210	0,72092	0,74411	0,48950
220	0,72065	0,74380	0,48920
230	0,72091	0,74409	0,48948
240	0,72111	0,74436	0,48974
250	0,72118	0,74439	0,48978
260	0,72132	0,74452	0,48991
270	0,72125	0,74445	0,48984
280	0,72198	0,74523	0,49060
290	0,72172	0,74496	0,49033
300	0,72198	0,74523	0,49060
310	0,72295	0,74573	0,49110
320	0,72294	0,74572	0,49108
330	0,72551	0,74698	0,49233
340	0,72343	0,74662	0,49197
350	0,72542	0,74688	0,49223

Tabela C15 – Porosidade estimada pela Equações de Ergun, MacDonald e Endo para a queda de pressão de aproximadamente 9000 N/m² para o talco a velocidade 15,0 cm/s tendo como meio filtrante o poliéster, correspondente à Figura 4.7.

t (s)	ε		
	Ergun	MacDonald	Endo
0	1,0000	1,0000	1,0000
10	0,68574	0,70969	0,45694
20	0,72133	0,74458	0,48994
30	0,70765	0,73121	0,47700
40	0,68785	0,71177	0,45884
50	0,67289	0,69701	0,44551
60	0,66434	0,68855	0,43804
70	0,66229	0,68652	0,43627
80	0,65881	0,68307	0,43326
90	0,65903	0,68329	0,43345
100	0,65799	0,68226	0,43255
110	0,65824	0,68251	0,43277
120	0,65831	0,68257	0,43283
130	0,65850	0,68276	0,43300
140	0,65940	0,68366	0,43377
150	0,65868	0,68295	0,43314
160	0,66023	0,68448	0,43448
170	0,66098	0,68522	0,43513
180	0,66274	0,68697	0,43666
190	0,66425	0,68845	0,43795
200	0,66452	0,68873	0,43819
210	0,66589	0,69009	0,43939
220	0,66774	0,69192	0,44100
230	0,66912	0,66912	0,44257