



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DE GASES PARA  
O ESTUDO DA FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TORTAS DE  
FILTRAÇÃO**

**DEIVID MARQUES NUNES**

**Uberlândia - MG - Brasil**

**2011**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**



**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA DE FILTRAÇÃO DE GASES PARA  
O ESTUDO DA FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TORTAS DE  
FILTRAÇÃO**

Deivid Marques Nunes

Orientador:

Profº. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química na área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia – MG

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

---

N972c    Nunes, Deivid Marques, 1987-  
2011       Construção de um sistema de filtração de gases para o estudo da formação e remoção de tortas de filtração / Deivid Marques Nunes. - 2011.  
            132 f. : il.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Filtros e filtração - Teses. 3. Gases - Purificação - Teses. I. Damasceno, João Jorge Ribeiro. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

CDU: 66.0


---

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 30 DE SETEMBRO DE 2011

BANCA EXAMINADORA




Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno  
Orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Fábio Oliveira Arouca  
(FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Sérgio Mauro da Silva Neiro  
(FEQUI/UFU)



Prof.ª Dr.ª Mônica Lopes Aguiar  
(DEQ/UFSCar)

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Shirley Aparecida Marques e aos meus irmãos Diego Marques Nunes e Íngride Marques Nunes, pessoas mais importantes e que mais amo na minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a concretização deste trabalho.

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me amparar em todos os momentos, transmitindo segurança, paciência e sabedoria para prosseguir e driblar as dificuldades surgidas no caminho de forma serena.

Agradeço à minha mãe Shirley e meus irmãos Diego e Íngrid que sempre me apoiaram e incentivaram a seguir com os meus objetivos, contribuindo com bastante amor, carinho, amizade, humildade, dignidade e solidariedade na superação dos obstáculos e alegria nos diversos momentos.

Ao Professor João Jorge Ribeiro Damasceno pela orientação dessa dissertação, pelo respeito, pela amizade e pelos ensinamentos, contribuindo para meu crescimento profissional e pessoal, aumentando cada vez mais minha admiração como pessoa e professor, meu muito obrigado.

Ao Professor Fábio Oliveira Arouca pela amizade, confiança e dedicação no desenvolvimento deste trabalho, além da paciência e conselhos repassados, tornando-me uma pessoa mais segura e confiante.

À Professora Sandra Mara Santana Rocha que contribuiu na realização deste trabalho, primeiramente, devido à elaboração deste projeto e início da construção deste, e também contribuindo nas análises de resultados, além da amizade, ensinamentos e dedicação com a minha pessoa.

À Professora Mônica Lopes Aguiar por ter deixado às portas abertas da unidade de Filtração de gases da UFSCar para que eu pudesse desenvolver na linha de pesquisa e pela disposição a mim prestada.

Ao Eduardo H. Tanabe por ter me ajudado e acompanhado quando fui a UFSCar para conhecer a unidade de filtração de gases, mostrando o funcionamento do sistema de filtração e também pelas dicas operacionais e nas análises dos resultados sempre que precisei, mostrando bastante disposto e atencioso.

Ao Luciano Peske Ceron e à PUCRS por serem solidários ao tirar as microfotografias dos tecidos estudados sem algum custo e sim a favor da ciência, pelas informações e disponibilidade para compartilhamento de ideias e pela amizade formada.

À família do “Postinho”, em especial à Dona Maria que demonstrou enorme carinho e dedicação todos os dias e a qualquer momento.

Aos amigos Bruno e José Luiz, pela ajuda na realização dos experimentos e nas discussões de resultados, além da amizade construída e aos demais colegas da FEQUI.

Aos alunos de Iniciação Científica, Felipe Ferreira, Felipe Parreira, Vinícius e Tiago que contribuíram assiduamente na realização dos experimentos, com dedicação e comprometimento com a ciência e também por proporcionarem momentos de distração, meu muito obrigado.

Ao técnico mecânico da Faculdade de Engenharia Química Rodrigo pela ajuda na montagem da unidade de Filtração de Gases e também pela idéias compartilhadas e amizade.

À minha namorada Marina por me ajudar na tradução de alguns trabalhos e pela companhia e compreensão na reta final desse trabalho.

Aos amigos do PPG-EQ.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pelas instalações e equipamentos.

À FAPEMIG pelo apoio financeiro na construção da unidade experimental.

À CNPq pela concessão de bolsa de mestrado.





## SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE TABELAS .....	viii
ÍNDICE DE SÍMBOLOS .....	ix
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
1       INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....	1
1.1     Introdução .....	1
1.2     Objetivos Gerais .....	2
1.2.1   Objetivos Específicos .....	2
2       REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1     Aspectos gerais da filtração de gases .....	3
2.1.2   Tipos de tecidos utilizados .....	4
2.1.3   Tecidos trançados .....	5
2.1.4   Tecidos não-trançados.....	6
2.2     Algumas formas de tratamentos de tecidos.....	7
2.3     Mecanismos de captura de partículas .....	10
2.3.1   Mecanismo gravitacional .....	10
2.3.2   Mecanismo inercial .....	10
2.3.3   Mecanismo de interceptação direta .....	11
2.3.4   Mecanismo difusional .....	12
2.3.5   Mecanismo eletrostático.....	13

2.4	Formação de tortas de filtração.....	14
2.5	Mecanismo de limpeza .....	18
2.5.1	Limpeza por vibração mecânica .....	19
2.5.2	Limpeza por fluxo de ar reverso .....	20
2.5.3	Limpeza por pulso de ar reverso .....	21
2.6	Variáveis importantes na operação de filtração .....	21
2.6.1	Queda de pressão no sistema de filtração .....	21
2.6.2	Queda de pressão através do meio filtrante .....	22
2.6.3	Queda de pressão através da camada de pó .....	22
2.6.4	Permeabilidade do meio filtrante.....	23
2.6.5	Velocidade superficial de filtração .....	24
2.6.6	Porosidade da torta de filtração e do meio filtrante.....	26
2.6.7	Porosidade média das tortas de filtração através do método indireto..... .....	26
2.6.8	Porosidade média das tortas de filtração através do direto .....	27
2.6.9	Trabalhos relevantes sobre porosidade de tortas de filtração .....	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.1	Unidade Experimental .....	32
3.1.1	Sistema de alimentação de pó .....	34
3.1.2	Caixa de filtração.....	35
3.1.3	Direcionamento do fluxo.....	37
3.1.4	Medição e queda de pressão .....	38

3.1.5	Controle de umidade .....	38
3.2	Outros itens .....	39
3.3	Material pulverulento .....	39
3.4	Caracterização dos meios filtrantes .....	42
3.5	Calibração do gerador de pó .....	43
3.6	Calibração da placa de orifício .....	43
3.7	Metodologia Experimental.....	45
3.8	Filtração de gases.....	45
3.8.1	Limpeza.....	47
3.9	Obtenção da porosidade de tortas de filtração .....	48
3.9.1	Obtenção da massa de pó depositada por unidade de área .....	49
3.9.2	Obtenção da resistência específica do meio filtrante.....	49
3.9.3	Obtenção da permeabilidade dos meios filtrantes .....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	Caracterização dos meios filtrantes .....	52
4.2	Desempenho dos tecidos e influência da velocidade de filtração .....	54
4.3	Massa removida e massa retida .....	59
4.4	Determinação da porosidade de tortas de filtração pelo método indireto.....	66
4.4	Determinação da porosidade de tortas de filtração pelo método indireto.....	66
4.5	Resistência específica da torta .....	74
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS.....	78
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	81

APÊNDICE A : Calibração da placa de orifício .....	89
APÊNDICE B : Determinação da permeabilidade e resistência específica dos meios filtrantes .....	94
APÊNDICE C : Dados de filtração e porosidade .....	97
APÊNDICE D - Determinação da massa da torta de filtração, fração de massa retida e fração de massa removida.....	124

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura de um tecido plano .....	5
Figura 2.2	Tipos de tecidos trançados .....	6
Figura 2.3	Tecido não-trançado .....	7
Figura 2.4	Mecanismo de captura de partículas.....	10
Figura 2.5	Captura de partículas em relação ao tamanho da partícula .....	14
Figura 2.6	Filtração de profundidade e filtração superficial .....	15
Figura 2.7	a) Modelo dendrito; b) modelo aumentado e c) modelo combinado .....	15
Figura 2.8	Superposição dos dendritos na superfície do tecido .....	16
Figura 2.9	Determinação do ponto de colmatação do meio (a) .....	17
Figura 2.10	Determinação do ponto de colmatação do meio (b) .....	17
Figura 2.11	Mecanismo de limpeza por vibração mecânica .....	19
Figura 2.12	Mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso .....	20
Figura 2.13	Mecanismo de limpeza por pulso de ar reverso.....	21
Figura 3.1	Esquema geral da unidade experimental.....	33
Figura 3.2	Sistema de alimentação de pó .....	34
Figura 3.3	Esquema da caixa de filtração .....	35
Figura 3.4	Esquema da caixa de filtração: a) filtração e b) limpeza .....	36
Figura 3.5	Direcionamento do fluxo de gás e comando de válvulas .....	37
Figura 3.6	Manômetro diferencial do tipo U .....	38

Figura 3.7	Quarteamento de amostra manual e Jones .....	40
Figura 3.8	Distribuição granulométrica pelo modelo <i>RRB</i> .....	41
Figura 3.9	Calibração da placa de orifício .....	44
Figura 4.1	Microscopia eletrônica de varredura dos tecidos testados. Aumento de 50X: (a) Polipropileno; (b) Poliéster e (c) Acrílico .....	52
Figura 4.2	Resistência dos meios filtrantes .....	53
Figura 4.3	Queda de pressão em função da massa de pó depositada por unidade de área para o meio filtrante polipropileno, velocidades de filtração: (a) 0,050 m/s; (b) 0,075 m/s e (c) 0,10 m/s, e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	55
Figura 4.4	Queda de pressão em função da massa de pó depositada por unidade de área para o meio filtrante poliéster, velocidades de filtração: (a) 0,050 m/s; (b) 0,075 m/s e (c) 0,10 m/s, e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	56
Figura 4.5	Queda de pressão em função da massa de pó depositada por unidade de área para o meio filtrante acrílico, velocidades de filtração: (a) 0,050 m/s; (b) 0,075 m/s e (c) 0,10 m/s, e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	57
Figura 4.6	(a) e (b) Fração de massa removida e fração de massa retida, respectivamente, meio filtrante polipropileno, para velocidades de filtração de 0,05, 0,075 e 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	60
Figura 4.7	(a) e (b) Fração de massa removida e fração de massa retida, respectivamente, meio filtrante poliéster, para velocidades de filtração de 0,05, 0,075 e 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	61
Figura 4.8	(a) e (b) Fração de massa removida e fração de massa retida, respectivamente, meio filtrante acrílico, para velocidades de filtração de 0,05, 0,075 e 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	62
Figura 4.9	(a) e (b) Massa removida e massa retida, respectivamente, meios filtrantes polipropileno, poliéster e acrílico, para velocidade de filtração de 0,05 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	63
Figura 4.10	(a) e (b) Massa removida e massa retida, respectivamente, meios filtrantes polipropileno, poliéster e acrílico, para velocidade de filtração de 0,075 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	64
Figura 4.11	(a) e (b) Massa removida e massa retida, respectivamente, meios filtrantes polipropileno, poliéster e acrílico, para velocidade de filtração de 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s .....	65

Figura 4.12	(a) , (b) e (c) Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações da literatura, variando as velocidades superficiais de filtração e queda de pressão máxima, meio filtrante polipropileno .....	67
Figura 4.13	(a) , (b) e (c) Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações da literatura, variando as velocidades superficiais de filtração e queda de pressão máxima, meio filtrante poliéster .....	68
Figura 4.14	(a) , (b) e (c) Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações da literatura, variando as velocidades superficiais de filtração e queda de pressão máxima, meio filtrante acrílico .....	69
Figura 4.15	Comportamentodas camadas de pó com o aumento da carga mássica .....	70
Figura 4.16	(a) , (b) e (c) Resistência específica das tortas de filtração para diferentes meios filtrantes e diferentes velocidades superficiais de filtração .....	77

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1	Parâmetros de projetos mais utilizados na filtração de gases .....	3
Tabela 3.1	Resultados da regressão para modelo <i>RRB</i> .....	42
Tabela 3.2	Diâmetro da rocha fosfático por Difração de raio laiser .....	42
Tabela 3.3	Características e especificações dos meios filtrantes fornecidos pela Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros de Tecidos Ltda.....	42
Tabela 3.4	Esquema de execução dos experimentos .....	45
Tabela 4.1	Valor obtido para a resistência dos meios filtrantes ( $k_1$ ) e para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ).....	53
Tabela 4.2	Valores obtidos para a constante de permeabilidade darciana ( $k_m$ ) .....	54
Tabela 4.3	Valores das porosidades das tortas de filtração de gases obtidas para correlações literárias para velocidades de filtração diferentes e meio filtrante polipropileno.....	72
Tabela 4.4	Valores das porosidades das tortas de filtração de gases obtidas para correlações literárias para velocidades de filtração diferentes e meio filtrante poliéster.....	73
Tabela 4.5	Valores das porosidades das tortas de filtração de gases obtidas para correlações literárias para velocidades de filtração diferentes e meio filtrante acrílico.....	74
Tabela 4.6	Valores da resistência específica das tortas de filtração para diferentes velocidades de filtração, meio filtrante polipropileno.....	75
Tabela 4.7	Valores da resistência específica das tortas de filtração para diferentes velocidades de filtração, meio filtrante poliéster.....	75
Tabela 4.8	Valores da resistência específica das tortas de filtração para diferentes velocidades de filtração, meio filtrante acrílico.....	76



## ÍNDICE DE SÍMBOLOS

A	Área superficial de filtração.....[L <sup>-2</sup> ]
B <sub>m</sub>	Coeficiente de permeabilidade do meio filtrante.....[L <sup>3</sup> T <sup>2</sup> M <sup>-1</sup> ]
C <sub>r</sub>	Fator de correção ..... [-]
C <sub>d</sub>	Fator de correção para efeito de escorregamento para difusão browniana ..... [-]
C'	Fator de correção de Cunningham..... [-]
d <sub>f</sub>	Diâmetro das fibras.....[L]
d <sub>p</sub>	Diâmetro das partículas.....[L]
d <sub>63,2</sub>	Parâmetro estimado modelo <i>RRB</i> ..... [L]
F	Fator de escorregamento de Cunningham..... [L]
g	Aceleração da gravidade ..... [LT <sup>-2</sup> ]
k	Resistência total do meio filtrante ..... [ML <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup> ]
k <sub>m</sub>	Resistência específica do meio filtrante ..... [ML <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup> ]
k <sub>c</sub>	Resistência específica da torta de filtração.....[T <sup>-1</sup> ]
K <sub>ck</sub>	Constante empírica ..... [-]
Ku	Fator de Kubawara..... [-]
K <sub>nC</sub>	Número de Knudsen relativo ao coletor..... [-]
K <sub>M</sub>	Parâmetro adimensionaldo mecanismo dipolo imagem..... [-]
k <sub>1</sub>	Coeficiente de permeabilidade darciana ..... [L <sup>2</sup> ]
k <sub>2</sub>	Coeficiente de permeabilidade não darciana ..... [L]
n	Parâmetro estimado pelo <i>RRB</i> ..... [-]

$L_m$	Espessura do meio filtrante ..... [L]
$L_c$	Espessura da torta de filtração ..... [L]
$M_1$	Peso do saco descartável de aspirador de pó ..... [M]
$M_2$	Massa de pó coletada equivalente a uma rotação do prato de alimentação .... [M]
$M_t$	Massa da torta de filtração ..... [M]
NR	Parâmetro de interceptação ..... [-]
Pe	Número de Peclet..... [-]
St	Número de Stokes..... [-]
Q	Vazão mássica..... [MT <sup>-1</sup> ]
q	Carga da partícula ..... [C]
t	Tempo de filtração..... [T]
$t_i$	Tempo de filtração correspondente ao ponto calculado..... [T]
$t_T$	Tempo total de filtração ..... [T]
T	Temperatura ..... [K]
t	Tempo de filtração..... [T]
$V_f$	Velocidade superficial de filtração ..... [LT <sup>-1</sup> ]
$v_t$	Velocidade terminal da partícula ..... [LT <sup>-1</sup> ]
W	Massa de pó depositada por unidade de área ..... [ML <sup>-2</sup> ]
t	Tempo de filtração..... [T]
$\alpha$	Coeficiente de resistência viscosa ..... [-]
$\varepsilon$	Porosidade ..... [-]
$\varepsilon_0$	Permissividade do vácuo ..... [C <sup>2</sup> M <sup>-1</sup> T <sup>2</sup> L <sup>-3</sup> ]

$\varepsilon_c$	Constante dielétrica da partícula..... [-]
$\varepsilon_f$	Constante dielétrica do fluido ..... [-]
$\gamma$	Coefficiente de polarização do coletor ..... [-]
$\mu_g$	Viscosidade do gás ..... [ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]
$\rho_p$	Densidade da partícula ..... [ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_g$	Densidade do gás ..... [ML <sup>-3</sup> ]
$\rho$	Densidade total do meio ..... [ML <sup>-3</sup> ]
$\rho_s$	Densidade do sólido ..... [ML <sup>-3</sup> ]
$\lambda$	Percurso livre médio das partículas ..... [-]
$\Delta P_T$	Queda de pressão total.....[MLT <sup>-2</sup> ]
$\Delta P_m$	Queda de pressão no meio filtrante ..... [MLT <sup>-2</sup> ]
$\Delta P_t$	Queda de pressão na torta ..... [MLT <sup>-2</sup> ]
$\Delta P_s$	Queda de pressão na estrutura do meio filtrante.....[MLT <sup>-2</sup> ]
$\Delta P$	Queda de pressão ..... [MLT <sup>-2</sup> ]
$\eta_T$	Eficiência global de coleta ..... [%]
$\eta_G$	Eficiência de coleta gravitacional ..... [%]
$\eta_I$	Eficiência de coleta impactação inercial ..... [%]
$\eta_{ID}$	Eficiência de coleta interceptação direta ..... [%]
$\eta_D$	Eficiência de coleta difusional ..... [%]

$\eta_{ID}$	Eficiência de coleta interceptação direta ..... [%]
$\eta_e$	Eficiência de coleta elostrática ..... [%]

## NOMENCLATURAS

MEV	Microscópico eletrônico de varredura ..... [-]
RAP	Razão-ar-pano ..... [ $LT^{-1}$ ]

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo construir uma unidade experimental de filtração de gases e estudar a formação e remoção de tortas de filtração em diferentes meios filtrantes polipropileno, poliéster e acrílico cedidos pela empresa Gino Cacciari Ltda, SP. O material particulado que foi utilizado era um concentrado fosfático disponibilizado pela empresa FOSFERTIL, Patos de Minas, cuja densidade de  $2,89 \pm 0,009 \text{ g/cm}^3$  e diâmetro médio volumétrico foi de  $12,72 \mu\text{m}$ . O sistema de filtração construído era composto por uma caixa de filtração com área de filtração de  $314,16 \text{ cm}^2$ , um sistema de alimentação de pó com umidade controlada, manômetros, linhas de ar comprimido e um soprador. Para tal, foram realizados experimentos de filtração utilizando velocidades superficiais de filtração de 5, 7,5 e 10 cm/s, para cada queda de pressão máxima estabelecida de 10, 20, 30 e 40 cmH<sub>2</sub>O e cada filtro de tecido. Para a remoção das tortas de filtração aplicou-se o mecanismo de fluxo de ar reverso a uma velocidade de limpeza de 15 cm/s. Os ensaios foram realizados com o intuito de verificar o desempenho dos meios filtrantes na formação e remoção das tortas de filtração em relação à variação da queda de pressão máxima e da velocidade de filtração e determinar a porosidade de tortas de filtração para cada tecido estudado. Com isso, os resultados demonstraram que o acrílico foi o tecido que apresentou uma estrutura superficial mais aberta e maior permeabilidade, seguido do poliéster e polipropileno. A diferença na estrutura dos meios filtrantes proporcionou ao meio mais permeável, uma maior coleta de partículas, para as quatro quedas de pressão máxima estabelecida e maior período de filtração interna para as três velocidades estudadas, diferentemente, do polipropileno em que prevaleceu a filtração superficial. A quantidade de massa retida e massa removida foram maiores para o acrílico, posteriormente, poliéster e polipropileno, sendo que, a massa retida era maior para maiores velocidades de filtração, prevalecendo. A porosidade de tortas de filtração diminuiu com o aumento da espessura das tortas (aumento da queda de pressão estabelecida) e depois voltou a crescer. O meio filtrante de maior permeabilidade apresentou tortas mais porosas e menos resistentes. O termo quadrático da Equação de Ergun e MacDonald pode ser desprezível. As Equações de MacDonald e Kozeny-Carman apresentaram valores superiores às Equações de Ergun (1952) e Ergun Modificada, sendo que, a maior variação de porosidade foi para o acrílico (0,33 - 0,39), para poliéster (0,34 - 0,43) e polipropileno (0,36 - 0,48).

## ABSTRACT

The studies developed in this work aimed to build an experimental gas filtration unit and also study the formation and the removal of filter cakes in different filter media (polypropylene, polyester and acrylic) provided by Gino Cacciari Ltda., a company from São Paulo, Brazil. The particulate matter used in this study was a concentrated phosphate, provided by FOSFERTIL, a company from Patos de Minas, Brazil. The density of this material is  $2,89 \pm 0,009 \text{ g / cm}^3$ , and its volume average diameter is  $12,72 \mu\text{m}$ . The filtration system was built with five components, namely, a filtration box, with a filtration area of  $314,16 \text{ cm}^2$ ; a power feeding system with controlled humidity; manometers; compressed air lines; and a blower. The filtration experiments were performed in each fibrous filter, with three different superficial filtration velocities of 5, 7,5 e 10 cm/s, for each of the four established maximum pressure drop, which values were 10, 20, 30 and 40cmH<sub>2</sub>O. To remove the filter cakes, the reverse air flow mechanism was used with a cleaning velocity of 15 cm/s. The experiments were carried out aiming to verify the performance of the filter media in the formation and removal of filter cakes, according to the variation of the maximum pressure drop and the filtration velocity. Thus, it was possible to determine filter cakes porosity for each fibrous filter. The results showed that acrylic was the filter which presented an opener surface structure and a higher permeability, followed by polyester and polypropylene. For the four established maximum pressure drops, the difference of the filter media structure afforded a higher collection of particles in the acrylic, the most permeable filter. For the three velocities studied, that difference afforded a longer period of internal filtration, what did not happen to polypropylene, in which the superficial filtration prevailed. The amounts of retained mass and removed mass were larger in the acrylic, followed by polyester and polypropylene. Besides, the amount of retained mass was larger when filtration velocities were higher. Filter cake porosity was reduced as the result of the increased thickness of the cakes (increase in the established pressure drop) and then it started to increase again. The acrylic, the most permeable filter medium, presented more porous and less resistant cakes. At least, in the equations used in this study, the quadratic term in Ergun and MacDonald equations was negligible. The equations of MacDonald and Kozeny-Carman presented higher porosity values when compared to Ergun equations (1952) and modified Ergun equation, and the porosity variation was higher for acrylic (0,33 - 0,39), followed by polyester (0,34 - 0,43) and polypropylene (0,36 - 0,48).

---

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

---

Há diversos dispositivos utilizados na separação gás-sólido, sendo que, a filtração, consiste na operação mais comum e altamente eficiente na coleta de material particulado e pouco sensível as flutuações nas condições de operações (HINDS, 1982).

A filtração de gases utilizando filtros de tecido ou filtros de manga, industrialmente conhecidos, apresenta uma aplicação há muitos anos na separação de partículas em suspensão, sendo que, sua aplicação tem se predominado a partir da criação de filtros de tecidos sintéticos devido à algumas de suas características físicas tais como, alta eficiência de coleta, baixo custo, alta resistência mecânica, química, menor diâmetro de fibras e devido suportar elevadas temperaturas (DONOVAN, 1985).

O princípio de funcionamento dos filtros de tecido consiste na separação mecânica das partículas pelo escoamento do material particulado através do tecido e após um determinado período, pela camada de pó depositada em sua superfície denominada torta de filtração (DICKENSON, 1994).

Durante a operação de filtração, a queda de pressão no meio filtrante consiste em uma importante variável para o desempenho dos meios filtrantes, pois aumenta à medida que aumenta a espessura da torta de filtração, atingindo o valor máximo estabelecido de acordo com as condições de operação e condições econômicas, tornando necessária a remoção periódica da camada de pó formada.

Atualmente, diversos estudos sobre as características da formação e remoção de tortas de filtração de gases e suas propriedades tal como a porosidade das tortas de filtração e das variáveis na operação de filtração de gases vêm sendo desenvolvidos como fator de maior importância para utilização de filtros de tecidos com o intuito de tornarem a operação de filtração de gases cada vez mais simples, econômica e altamente eficiente, resultando na otimização em relação à regeneração dos meios filtrantes, minimização dos custos transformados em energia e dos impactos ao meio ambiente com a emissão de material particulado na atmosfera.

## **1.2- OBJETIVOS**

### **1.2.1- Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho foi o de construir um sistema de filtração de gases e estudar a influência das variáveis operacionais na formação e remoção das tortas de filtração em filtros de tecidos previamente tratados.

### **1.2.2- Objetivos específicos**

Dentro do objetivo geral, fizeram parte dos objetivos específicos as seguintes ações:

- Estudar o efeito das variáveis operacionais (quedas de pressão, velocidade superficial de filtração e velocidade de limpeza) na formação e remoção das tortas de filtração;
- Determinar a porosidade de torta de filtração através de equações clássicas da literatura;



---

## CAPÍTULO 2

---

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

O Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica sobre filtração de gases em filtros de tecido em que são abordados alguns conceitos fundamentais, principais variáveis de projeto, tipos de tecidos utilizados, mecanismos de limpeza dos tecidos e alguns dos principais trabalhos encontrados na literatura.

#### 2.1- Aspectos gerais de filtração de gases

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

Os parâmetros de projeto na filtração de gases mais importantes são representados na Tabela 2.1 com seus respectivos valores, segundo MATTESON (1987) apud SILVA (2008):

Tabela 2.1-- Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases (MATTESON, 1987) apud SILVA (2008)

Velocidade do fluido	0,8 a 10 cm/s
Queda de pressão do tecido limpo	60 a 200 Pa
Queda de pressão máxima de operação	500 a 2500 Pa
Concentração de pó	0,1 a 100 g/cm <sup>3</sup>
Massa de pó depositada por unidade de área	200 a 2000 g/m <sup>2</sup>
Eficiência de coleta	99,90 a 99,99 %

Outros dois parâmetros que são bastante importantes no projeto de filtros de gases são a porosidade das tortas de filtração e a temperatura. Segundo SILVA NETO et al. (2002), a

porosidade da torta tem grande influência na queda de pressão do sistema durante a operação de filtração bem como na força necessária para remoção da torta na operação de limpeza.

Com relação ao efeito da temperatura, FREITAS et al.,(2004) apud MELLO (2007), comprovou que, na utilização de filtros cerâmicos de dupla camada, em filtração de 25 a 700°C, a eficiência global de coleta diminuiu com o aumento da temperatura devido o aumento da temperatura provocar alterações nas propriedades do gás (diminuição da densidade e aumento da viscosidade) interferindo na capacidade de remoção da torta de filtração. Outra constatação foi que o aumento da temperatura pode provocar, em pequena magnitude, uma mudança estrutural do meio filtrante devido à expansão térmica, o que pode afetar consideravelmente a operação de remoção da torta de filtração.

### **2.1.2- Tipos de tecidos utilizados**

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

Outros fatores importantes que devem levados em consideração são: a resistência mecânica, estabilidade e a flexibilidade do tecido, pois, são responsáveis em determinar sua capacidade de resistir ao desgaste provocado pela abrasão, ou seja, o contato das fibras do tecido com as partículas do material pulverulento ou entre as fibras adjacentes. A flexibilidade do tecido é uma propriedade que deve ter uma atenção especial, pois, pode facilitar a sua limpeza, melhorando a limpeza do material filtrante, como também pode facilitar a degradação do mesmo, reduzindo sua vida útil (BARROS, 2010).

Assim, os tecidos, atualmente, confeccionados e utilizados em meios industriais para a filtração de gases são classificados em tecidos trançados e tecidos não trançados (feltros) e são constituídos por fibras e fios.

As fibras são as componentes do fio, confeccionadas com materiais naturais ou sintéticas e compostas por fibras curtas (segmentadas) denominadas de fibras cortadas ou por filamentos, que são fibras contínuas (CHEREMISINOFF; YOUNG (1977) apud TANABE (2008)).

As fibras são transformadas em fios através do processo de fiação, no qual as fibras são “torcidas” em fios, sendo esta medida através do número de voltas por plegada. Quanto mais torcido for o fio, mais resistente este será até um ponto limitante (DONOVAN, 1985). Os fios formados por filamentos são considerados ótimos quando tiverem seis voltas por plegadas, já às fibras cortadas são de 10 a 20 voltas, ultrapassando esses valores o fio torna-se quebradiço (CHEREMISINOFF; YOUNG (1977) apud TANABE (2008)).

### 2.1.3- Tecidos trançados

A maioria dos tecidos confeccionados industrialmente e utilizados na operação de filtração de gases são trançados ou parcialmente trançados. Em filtros de mangas em que o fluxo gasoso percola de dentro das mangas para fora, são usados tecidos trançados (MYCOCK et al (1995) apud TIENI (2005)). De acordo com a ABNT/TB-392, um tecido trançado consiste de uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de urdume e outro de trama, formando um ângulo igual ou aproximado de 90°. O urdume significa um conjunto de fios que percorrem longitudinalmente em um pano e que forma a estrutura básica do tecido trançado e a trama corresponde ao fio que é entrelaçado com o urdume, conforme Figura 2.1.

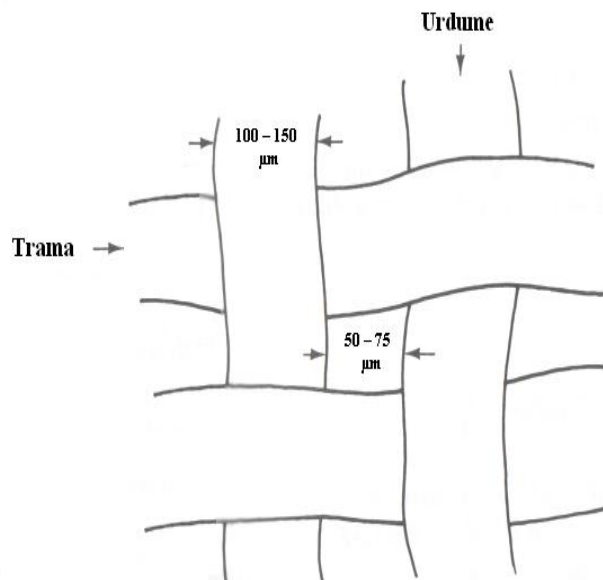


Figura 2.1: Estrutura de um tecido plano (COOPER et al, 2002).

Os tecidos trançados são classificados em três tipos: trançados planos, sarja e cetim. Os mais simples entre esses são os trançados planos em que cada fio da trama passa acima e abaixo do urdume. O tecido trançado do tipo sarja é um tecido mais resistente e mais flexível que o tecido trançado plano, pois é formado pelo entrelaçamento de um a quatro fios longitudinais em sequência do fio transversal e ao fim de cada linha sucessiva, o padrão é alterado em um passo para a direita ou esquerda. O terceiro tipo, o tecido trançado do tipo cetim, é um tecido menos resistente e é formado pelo entrelaçamento de mais de quatro fios longitudinais um de cada vez. É responsável em promover o aspecto acetinado ao tecido.

A Figura 2.2 ilustra os tipos de tecidos trançados.

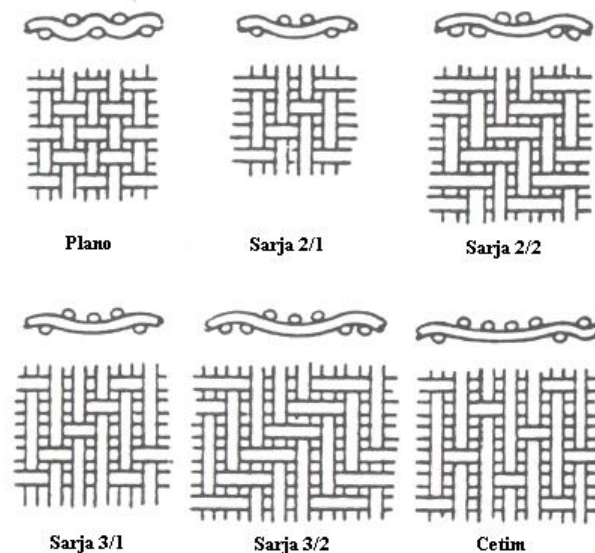


Figura 2.2: Tipos de tecidos trançados (DAVIS, 1992)

#### 2.1.4- Tecidos não trançados

Os tecidos não trançados, também conhecidos como feltros, diferentemente dos tecidos trançados, são mais aplicados em operações de filtração de gases para filtros mangas em que o processo de limpeza é realizado por jato pulsante.

Geralmente, são utilizados com materiais pulverulentos mais densos (areia, pedra calcária e grãos) e apresentam vida útil maior das mangas, porém oferecem maior resistência ao fluxo gasoso (MYCOCK et al (1995) apud TIENI (2005)).

De acordo com MARTINS (2001), o tecido não trançado possui uma estrutura plana, flexível e porosa constituída de filamentos orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico, químico, térmico ou pela combinação destes.

A produção de feltros dá-se pela formação da manta (uma ou mais camadas de véus), em que essas camadas são obtidas por cardagem, por fluxo de ar, através de deposição eletrostática, suspensão em meio líquido ou fiação direta de filamentos contínuos.

Em seguida a manta passa por processos químicos (resinagem, secagem e polimerização), por processos mecânicos (agulhagem, que consiste no entrelaçamento das fibras, costura ou jateamento com água), por processos físicos (calor e pressão).

Os feltros apresentam em sua estrutura mais poros por unidade de área que os tecidos trançados, devido ao próprio processo de fabricação (HARDMAN, 2001).

A Figura 2.3 ilustra um tecido não trançado.

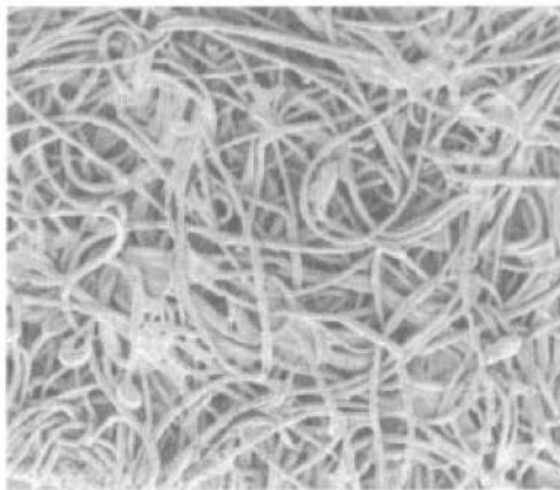


Figura 2.3: Tecido não trançado ou feltro (RODRIGUES, 2006)

## 2.2- Algumas formas de tratamentos de tecidos

Uma das características que deve ser considerada em um tecido é a sua capacidade de promover na limpeza, o desprendimento das partículas coletadas durante o processo de filtração. Com isso, muitos tecidos têm sofrido alguns tratamentos (mecânicos, químicos, térmicos) em um de seus lados que possibilitam aumento da eficiência dos meios filtrantes no processo de filtração e limpeza (DONOVAN, 1985).

De acordo com HARDMAN (2001) existem alguns fatores que propiciam os tratamentos de acabamento dos tecidos. São eles:

- a) regulação da permeabilidade ao ar do tecido e eficiência de coleta;
- b) estabilidade adequada ao tecido em relação ao encolhimento, alongamento e ruptura, por exemplo;
- c) modificação das características superficiais, principalmente, em relação ao desprendimento das tortas de filtração;
- d) minimização da penetração das partículas e diminuição da colmatação do tecido (MAUSCHITZ, et al 2005).

Com isso, a seguir serão descritos os seguintes tratamentos utilizados para garantir melhor desempenho na operação de filtração.

- Calandragem (“*Calendering*”): é um processo no qual o tecido é comprimido uma ou mais vezes por rolos com elevada temperatura e alta pressão em que comprime a superfície do tecido, com o intuito de obter uma superfície uniforme, maior brilho e melhor acabamento ao tecido. Este processo é aplicado em tecidos não trançados e a temperatura é uma variável do processo em calandragem a quente (DONOVAN, 1985).
- Chamuscagem (“*Singering*”): nesse processo é utilizada uma chama para queimar as fibras salientes da superfície do tecido, evitando que as fibras do tecido incorporem à torta e dificultem o processo de limpeza.
- Escovação (“*Napping*”): é um processo que consiste em promover uma raspagem na superfície do tecido que resulta no levantamento das fibras do tecido aumentando a área de coleta de partículas. A aplicação dessa técnica é em tecidos trançados em que a eficiência inicial de captura é baixa (ROTHWELL, 1989).
- Impregnação química: nesse processo, o tecido recebe um banho químico com o objetivo de melhorar o desempenho do material, reduzir o ataque químico e aumentar a resistência em relação aos ácidos, além de retardar a propagação da chama e facilitar o desprendimento das tortas de filtração (CLARK, 2001).
- Envernizamento ou envidramento (“*Glazing*”): o processo de envernizamento ou envidramento consiste em submeter às fibras a altas temperaturas e pressões, ou seja, calandragem a quente, no qual ocorre a fusão das fibras e estas são envolvidas em resina natural ou sintética, apresentando um aspecto vitrificado. Este tipo de

tratamento proporciona um melhor desempenho na resistência mecânica do material (DONOVAN, 1985).

TUNG et al, (2006) estudaram os efeitos do tratamento de calandragem de filtros de tecido de características transientes da torta de filtração e da permeabilidade dos filamentos em relação ao fenômeno de deposição das partículas na fase inicial de filtração através da análise quantitativa das forças microscópicas. Utilizaram o *software* FLUENT<sup>TM</sup> com o objetivo de obter o fluxo padrão e a resistência ao fluxo de fluido dos interstícios após o tratamento de calandragem no tecido. Desenvolveram também um programa numérico para simular as três dimensões do fenômeno de deposição sobre o tecido calandrado. A simulação foi realizada utilizando uma estação de trabalho SUN SPARC Ultra do programa FORTRAN 90 nas seguintes etapas de tempo e campo de fluxo, geração de partículas e distribuição de tamanho de partículas, movimento e deposição das partículas e estimativa da resistência de filtração, para diferentes tecidos calandrados com diferentes permeabilidades e porosidades. Os resultados demonstraram que para tecidos agulhados o fluxo predominava através dos fios de tecido, ao contrário dos tecidos trançados, em que o fluxo se predominava ao redor dos fios. Os resultados simulados neste trabalho demonstraram que houve um menor entupimento dos poros do filtro mesmo sabendo que, o tecido tratado por calandragem aumenta a resistência ao fluxo de gás.

### 2.3- Mecanismos de captura de partículas

A deposição inicial das partículas nas fibras do meio filtrante ocorre devido à influência de cinco mecanismos de captura: gravitacional, impactação inercial, interceptação direta, difusional e eletroforético apresentados na Figura 2.4.

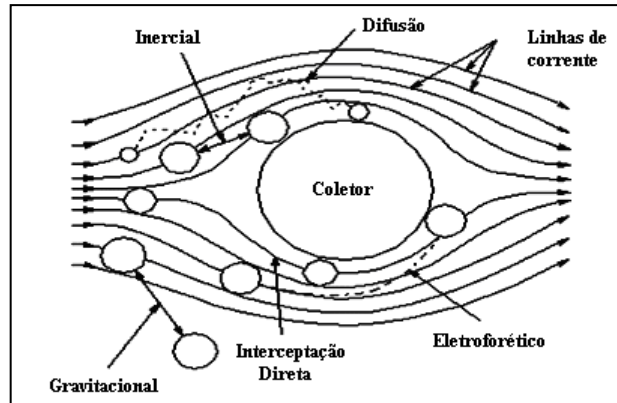


Figura 2.4: Mecanismos de captura de partículas (SPURNY, 1998)

**Gravitacional:** todas as partículas estão sujeitas ao efeito gravitacional que provoca um desvio na sua trajetória original. Este mecanismo é predominante em partículas maiores que  $5 \mu m$  com baixas velocidades (CAPES et al, 1997). O coletor pode ser fibroso ou leito granular. A eficiência de coleta será maior quando o fluxo ocorrer de cima para baixo. Assim, a eficiência de coleta através do mecanismo gravitacional pode ser calculada através da seguinte equação (MATTESON, 1987 *apud* RODRIGUES, 2005):

$$\eta_G = \frac{d_p^2 \rho_p g}{18 \mu_g V_g} = \frac{v_t}{V_g} \quad (2.1)$$

Em que,  $V_g$  é a velocidade do gás,  $\rho_p$  é a densidade das partículas,  $d_p$  é o diâmetro das partículas,  $\mu_g$  é a viscosidade do gás,  $v_t$  velocidade terminal da partícula,  $g$  aceleração da gravidade.

**Impactação inercial:** A captura é resultante da inércia das partículas, ou seja, as partículas devido a sua massa e velocidade ao se aproximarem do meio filtrante tendem a seguir sua trajetória original colidindo com a fibra e aderindo ao filtro (DULIEN, 1989). A eficiência de



coleta das partículas por este mecanismo é determinada através do número de Stokes, e aumenta com a energia cinética das partículas:

$$St = \frac{V_F \rho_p d_p^2}{18 \mu_g d_f} \quad (2.2)$$

em que,  $V_F$  é a velocidade superficial de filtração,  $\rho_p$  é a densidade das partículas,  $d_p$  é o diâmetro das partículas,  $\mu_g$  é a viscosidade do gás e  $d_f$  é o diâmetro das fibras. Assim, a eficiência de coleta pelo mecanismo de captura inercial é estabelecida pela seguinte equação (MELLO, 2007):

$$\eta_I = \frac{0,0334 St^{3/2}}{1 + 0,0334 St^{3/2}} \quad (2.3)$$

Em que,  $St$  número de Stokes.

**Interceptação direta:** o mecanismo de interceptação direta ocorre quando as partículas acompanham o fluxo de corrente do gás entre as fibras do meio filtrante. A interceptação acontece, porque as partículas possuem raio maior que o espaçamento entre as fibras, ficando retidas no tecido e seguindo a mesma trajetória do fluxo original (THEODORE, 2008). A eficiência de coleta pelo mecanismo interceptação direta pode ser determinada pela seguinte equação (LIU; RUBOW (1990)).

$$\eta_{ID} = 0,6 \left( \frac{\varepsilon}{Ku} \right) \frac{NR^2}{(1 + NR)} C_r \quad (2.4)$$

em que,

$$C_r = 1 + \frac{1,996 K_{nC}}{NR} \quad (2.5)$$

E  $NR$  é o parâmetro de interceptação,  $K_{nC}$  o número de Knudsen relativo ao coletor e  $C_r$  fator de correção.

**Mecanismo difusional ou produzido pelo movimento browniano:** esse mecanismo de captura ocorre devido ao movimento aleatório das partículas que se deslocam de um meio de alta concentração para uma área de baixa concentração próxima ao coletor. As partículas são muito pequenas e seu movimento pode ser influenciado pelo bombardeamento do gás, provocando um movimento irregular e a colisão das partículas na fibra. Esse tipo de movimento é denominado browniano e é predominante para partículas de  $0,1\mu m$  a  $1\mu m$  (THEODORE, 2008), ou seja, a difusão somente será significativa para partículas de diâmetro submicrômicas (HUNG et al, 2004). A eficiência de coleta através do mecanismo difusional ou browniano é determinada pela equação a seguir (PAYET et al (1992)):

$$\eta_D = 1,6 \left( \frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d C_d'' \quad (2.6)$$

em que,

$$C_d = 1 + 0,388 K_{nC} \left( \frac{\varepsilon Pe}{Ku} \right)^{1/3} \quad (2.7)$$

e

$$C_d'' = \frac{1}{1 + 1,6 \left( \frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d} \quad (2.8)$$

Em que,  $C_d$  é o fator de correção para o efeito de escorregamento para difusão browniana,  $Ku$  é o fator de Kubawara,  $Pe$  é o número de Peclet,  $K_{nC}$  é o número de Knudsen relativo ao coletor e  $\varepsilon$  é a porosidade.

**Eletrostática:** as partículas no processo de filtração podem possuir algum grau de carga eletrostática devido aos choques e atritos entre elas e o filtro. Os mecanismos de coleta por deposição eletrostática são: coulômbico e dipolo-imagem. No coulômbico ocorre à atração entre as partículas carregadas e o coletor carregado com carga elétrica oposta, e o dipolo-imagem, ocorre à atração entre a partícula carregada e o dipolo induzido no coletor globalmente neutro (AGUIAR, 1991). A eficiência de coleta nesse mecanismo é maior quando há um aumento da magnitude da atração elétrica, diminuição do tamanho das partículas e da vazão do gás (CAPES et al (1997)). A eficiência de captura da partícula

carregada com carga  $q$  através do mecanismo eletrostático ou eletroforético pode ser determinada por:

$$\eta_e = 8,2442 K_M^{0,494} \quad (2.9)$$

em que,

$$K_M = \frac{\gamma_c F_s q^2}{3\pi^2 \varepsilon_0 d_p d_f^2 \mu_g V_f} \quad (2.10)$$

Considerando  $St < 10^{-3}$  e  $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$ ,  $K_M$  é o parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem,  $\varepsilon_0$  é a permissividade vácuo =  $8,855 \cdot 10^{-12}$  As/V,  $q$  a carga da partícula,  $d_f$  o diâmetro da fibra,  $d_p$  o diâmetro da partícula,  $\mu_g$  a viscosidade do gás,  $V_f$  a velocidade do fluido,  $F_s$  o fator de escorregamento de Cunningham e  $\gamma_c$  o coeficiente de polarização do coletor, e que,

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_f}{\varepsilon_c + 2\varepsilon_f} \quad (2.11)$$

Com  $\varepsilon_c$  sendo a constante dielétrica da partícula e  $\varepsilon_f$  a constante dielétrica do fluido.

A Figura 2.5 apresenta esquematicamente a relação entre a eficiência de coleta devidos aos vários mecanismos de captura de partículas e o efeito que o diâmetro do particulado provoca em cada um deles para a filtração em leito granular com velocidade de filtração de 0,11 m/s (COURY, 1983). É preciso chamar a atenção para o fato de que a eficiência de captura é aproximadamente igual à soma das eficiências de cada um dos mecanismos mencionados. Porém isso não é inteiramente correto, pois há influência de um mecanismo sobre o outro (SILVA NETO, et al (2002)).

A eficiência de coleta será menor ou maior de acordo com o diâmetro das partículas. Com isso, percebe-se na Figura 2.5 que os mecanismos gravitacional, inercial e de interceptação direta são mais atuantes em partículas maiores que  $2\mu m$ . Já mecanismo

eletroforético tem maior influência na faixa de diâmetros de partículas de  $0,1 < d_p < 2\mu m$  e o mecanismo difusional tem maior significância em partículas de diâmetros menores  $0,3\mu m$ .

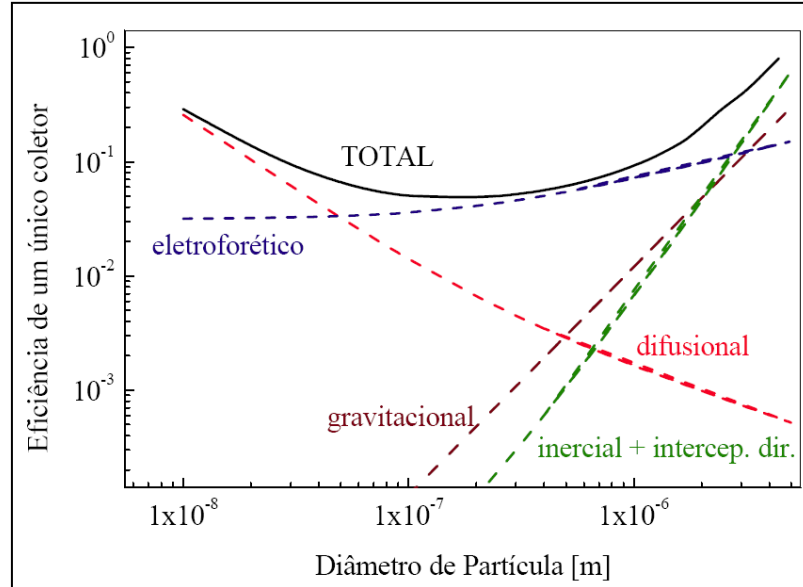


Figura 2.5: Mecanismo de captura de partículas em relação ao tamanho da partícula (COURY,1983)

A eficiência total de coleta pode ser obtida pela soma de todos os mecanismos atuantes:

$$\eta_T = \eta_D + \eta_{ID} + \eta_I + \eta_G + \eta_e \quad (2.12)$$

## 2.4 - Formação da torta de filtração

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

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

Assim, a intensidade de penetração das partículas no tecido tende a diminuir em função do tempo de filtração e aumentar a eficiência de coleta das partículas e, conseqüentemente, a queda de pressão. Ao atingir o valor da queda de pressão máxima pré-estabelecida para a unidade experimental, tem-se a necessidade de fazer a limpeza do meio filtrante. A captura das partículas nesta etapa pode ocorrer através dos mecanismos inercial, interceptação direta, movimento browniano e, em casos especiais, mecanismos eletrostáticos (WALSH, 1996). A Figura 2.6 representa a etapa de filtração em profundidade e superficial.

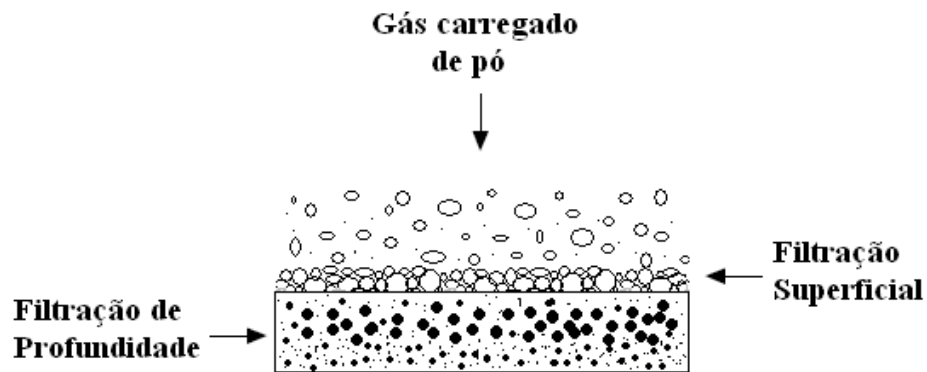


Figura 2.6: Filtração de profundidade e filtração superficial.

Na etapa de transição, à medida que ocorre o processo de filtração, percebe-se que há a aglomeração de partículas no interior do tecido formando os chamados dendritos que serão os novos meios de coleta das partículas (RODRIGUES, 2006). Segundo BERGMAN et al., 1981, a aglomeração dessas partículas ou o entupimento do tecido por partículas (modelo combinado) ocorre em quatro estágios, conforme visualizado na Figura 2.7.

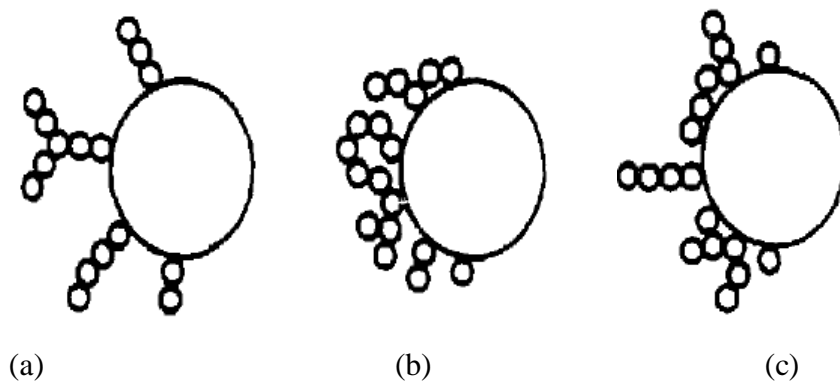


Figura 2.7: (a) Modelo dendrito, (b) modelo aumentando a fibra e (c) modelo combinado (BERGMAN et al., 1981).

O primeiro estágio é a deposição das partículas nas fibras do tecido limpo (pode ser caracterizado como o aumento das fibras), o segundo estágio ocorre quando uma quantidade de partículas se deposita na superfície do tecido e inicia-se a formação dos dendritos (modelo dendritos), o terceiro estágio é a fase em que há o crescimento desses dendritos e a interação com os dendritos vizinhos (que pode ser mais uma vez semelhante ao aumento das fibras) e a quarta e última etapa caracteriza-se quando os dendritos formados passam a constituir a torta de filtração.

A Figura 2.8 representa a superposição dos dendritos sobre as fibras.

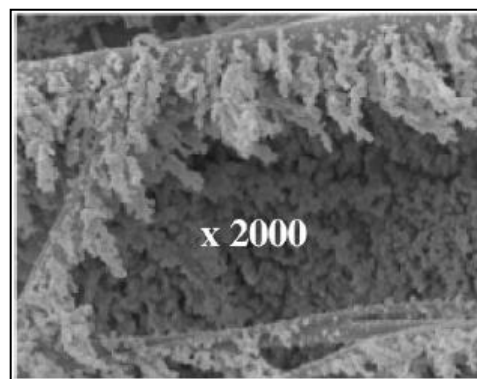


Figura 2.8: Superposição dos dendritos na superfície do tecido (THOMAS et al., (2001))

O início da formação da torta de filtração, para alguns autores, é demarcado através da adoção de um valor experimental que estabelece o ponto em que a torta se forma (ROCHA, 2010). Esse ponto é denominado de ponto de colmatação.

Para WALSH (1996), esse ponto de colmatação é representado pela Figura 2.9, que consiste no lugar geométrico obtido para o cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas em que é obtida a massa de pó necessária para a formação da torta.

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

Com isso, a formação da torta é representada pelo ponto de transição superior da curva de carga de queda de pressão, em que as mudanças da queda de pressão são lineares, conforme Figura 2.10.

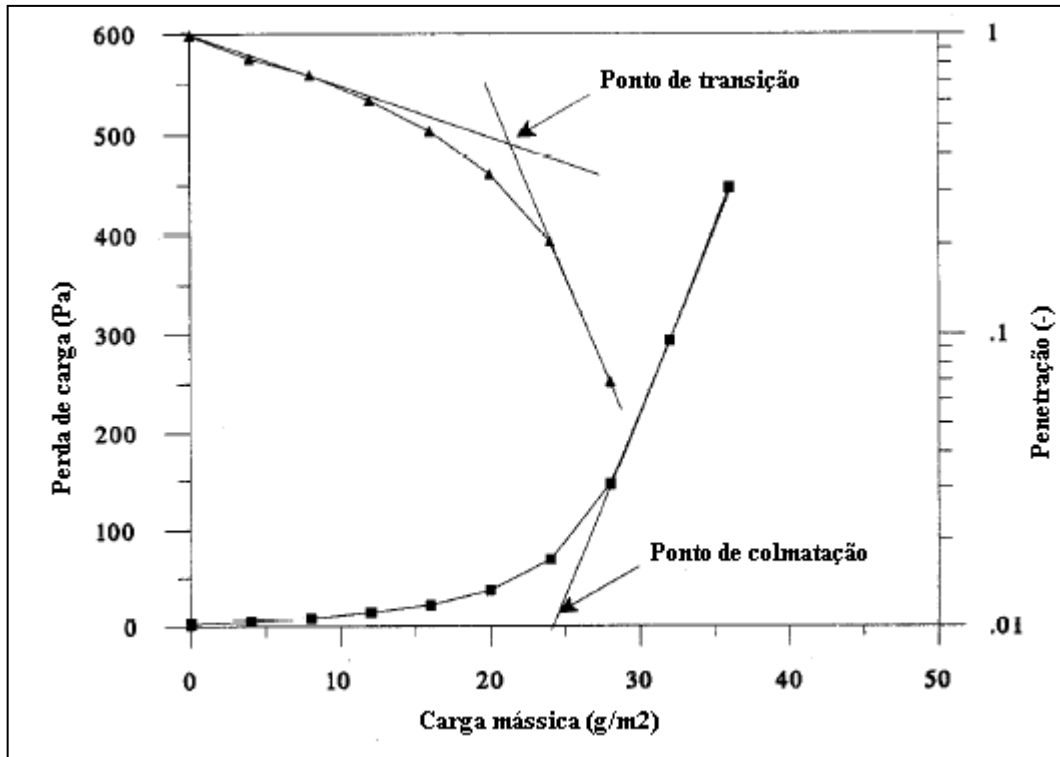


Figura 2.9: Ponto de colmatação do meio poroso (WALSH et al., 1996)

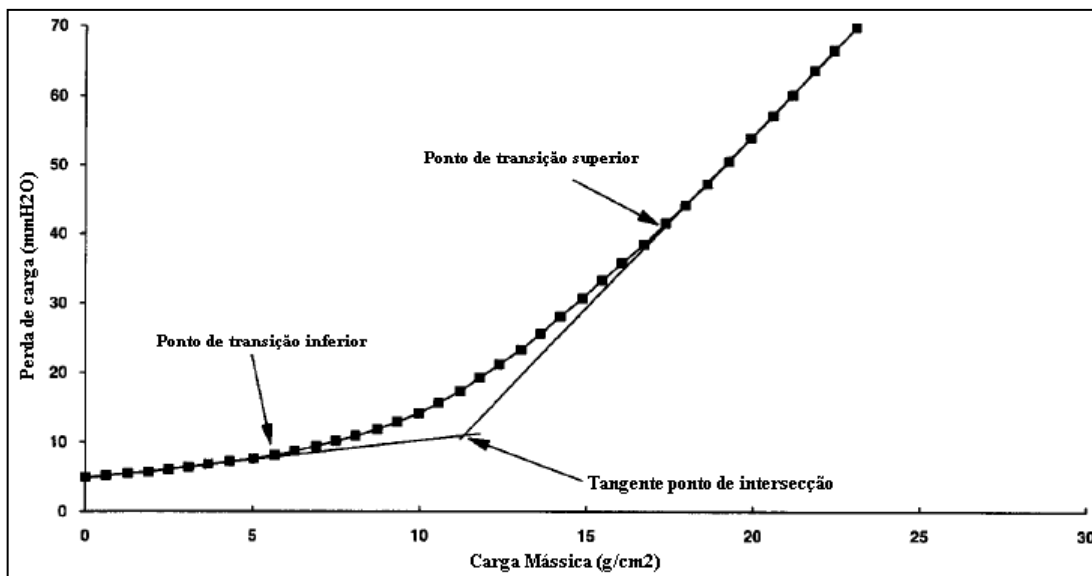


Figura 2.10: Ponto de colmatação do meio poroso (JAPUNTICH et al., 1996)

Após a formação da torta de filtração tem-se a última etapa denominada de filtração superficial, em que o meio filtrante atua como suporte para a torta de filtração e a torta de filtração como o principal meio coletor de partículas, isso devido às fibras do tecido ficarem saturadas, sendo possível a captura das mais finas partículas presentes na corrente de gás, aumentando a eficiência do processo de filtração (BARROS, 2010).

CHEN & HSIAU (2009a) estudaram a formação e o crescimento das tortas de filtração e desenvolveram um método experimental para melhor entendimento desse fenômeno, bem como um sistema *on-line* de medição de deslocamento de pressão para medir a espessura da torta de filtração. Em seus experimentos foram utilizadas cinco velocidades superficiais de filtração, 17, 20, 25, 28 e 32 cm/s, concentração de particulado de 200 g/m<sup>3</sup>, um material particulado com um diâmetro volumétrico de 8 µm e densidade de 2,167 g/cm<sup>3</sup> e uma área de filtração de 196 cm<sup>2</sup>. Utilizaram a equação de Ergun para encontrar a porosidade da torta, resistência específica da torta e mecanismos de coleta de impactação inercial e de difusão. Em seus resultados, concluíram que altos valores de velocidades superficiais de filtração resultaram em um maior grau de compactação da torta de filtração, maior resistência específica da torta e maior eficiência de coleta de partículas e que a espessura da torta de filtração e a velocidade superficial de filtração muito influenciam no desempenho do filtro.

NI et al (2006) desenvolveram um modelo computacional com o objetivo de simular a formação da torta de filtração e seu crescimento. Esse modelo pode ser usado para modelagem tridimensional do sistema de filtração, no qual a espessura da torta, porosidade média da torta, volume filtrado e queda de pressão através do filtro podem ser obtidos em função do tempo de filtração. A simulação foi desenvolvida no software FORTRAN<sup>TM</sup> e foi utilizada a equação de Kozeny-Carman para calcular a queda de pressão através do filtro. Os autores chegaram a resultados em que o modelo não apenas gera informações detalhadas sobre a formação e crescimento da torta de filtração como também se pode avaliar o desempenho em diferentes condições, considerando presentes inúmeras forças, incluindo a gravidade, flutuação, arrastes de fluidos, forças de Van der Waals e outras afetarão a embalagem, o fluxo e o comportamento do endurecimento da torta de filtração.

## 2.5- Mecanismos de limpeza

As técnicas de limpeza são utilizadas quando a torta de filtração atinge a espessura determinada pela queda de pressão máxima admitida no filtro tendo que ser removida do meio filtrante. Esse processo de limpeza deve ser realizado de forma muito prudente, pois uma remoção de torta muito rigorosa pode reduzir a vida útil do tecido e uma má remoção da camada porosa ocasiona um aumento da queda de pressão residual (TANABE, 2008).

DAVIS (2000) defende que, para especificar um filtro de tecido ou filtro de mangas, deve-se conhecer o método de limpeza a ser aplicado. Com isso, expõe que a remoção de torta do meio filtrante é dada pela combinação dos seguintes efeitos:



- a) deflexão do tecido/torta, para fraturar e separar a torta do tecido;
- b) aceleração do tecido/torta, para aumentar o rendimento das forças de separação;
- c) fluxo e gás na direção reverso-inversa, para incrementar o rendimento das forças aerodinâmicas que separam o pó do tecido e, conseqüentemente, movem o pó para o coletor.

Portanto, considerando tais influências, alguns dos mecanismos de limpeza em filtros de mangas mais utilizados são: vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso.

Vibração mecânica: essa técnica é considerada a mais antiga utilizada em filtros mangas e a de baixo custo. Essa técnica consiste em agitar ou vibrar o tecido por meio de um motor excêntrico que provoca uma aceleração no tecido que é em função da frequência, oscilação e amplitude de vibração aplicada que promove a limpeza do meio filtrante. O sistema de operação e montagem é considerado muito simples e o tempo de duração de limpeza varia de 1 a 5 minutos, interrompendo-se o processo de filtração de gases (COOPER et. al., 2002).

A Figura 2.11 ilustra o esquema da técnica de vibração mecânica.

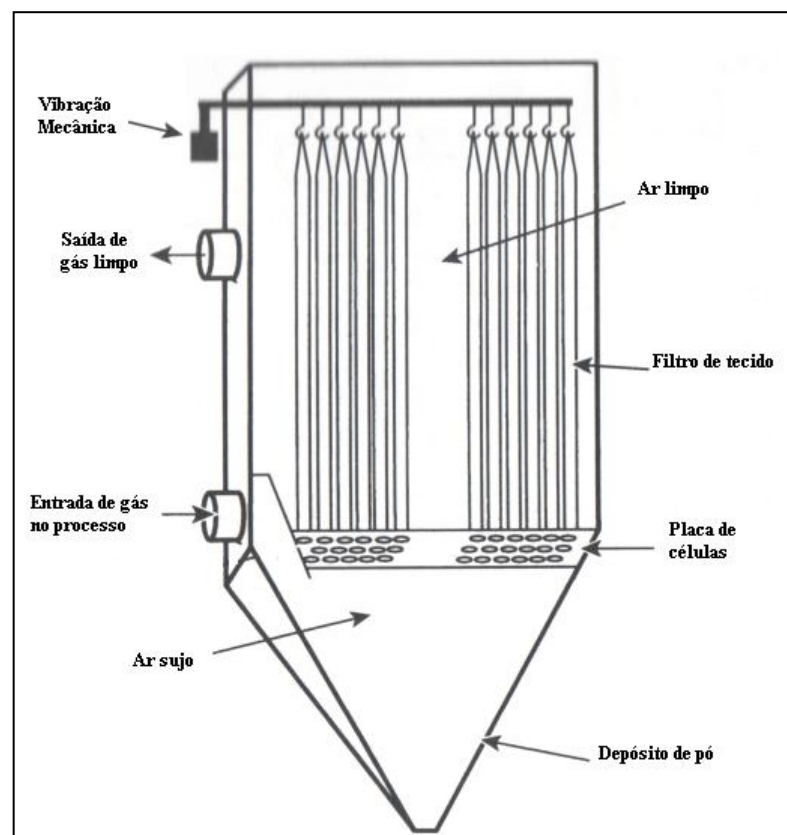


Figura 2.11: Mecanismo de limpeza por vibração mecânica (BROWN et al.,2002).

Fluxo de ar reverso: a técnica de limpeza do meio filtrante por fluxo de ar reverso consiste na passagem do fluxo de ar limpo em sentido contrário ao processo de filtração de gases, no qual há a fratura e deslocamento da torta do tecido. Essa técnica, assim como a técnica de vibração mecânica, é simples e requer a interrupção da filtração durante o processo de limpeza. Costuma ter uma duração de 1 a 5 minutos. A vantagem dessa técnica sobre a vibração mecânica é que a vida útil do tecido é maior devido ao fato de apresentar menor impactação mecânica. A Figura 2.13 ilustra o esquema da técnica de fluxo de ar reverso.

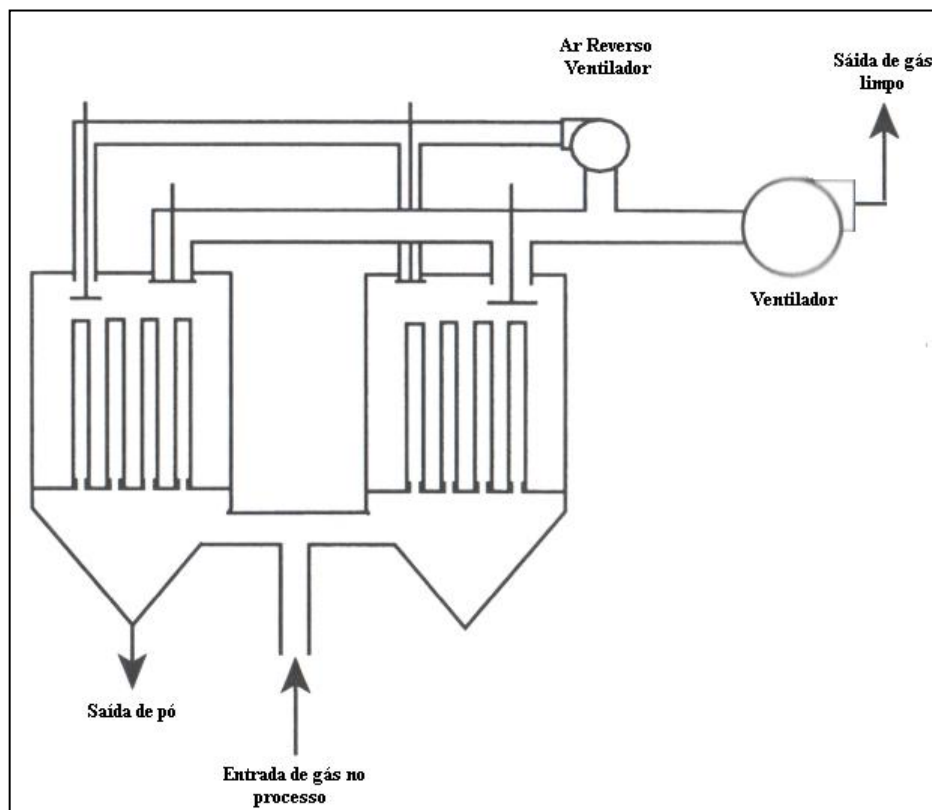


Figura 2.12: Mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso (BROWN et al., 2002).

Pulso de ar reverso: a técnica de limpeza por pulso de ar reverso apresenta algumas vantagens em relação às outras técnicas. Uma das grandes vantagens desse método é que permite a limpeza do tecido ou meio filtrante sem interrupção do processo de filtração. A desvantagem desse método é que reduz a vida útil do tecido e de sua eficiência de coleta devido maior desgaste das fibras (COOPER et al., 2002).

O princípio de funcionamento dessa técnica é similar ao fluxo de ar reverso, em que a torta de filtração é submetida a pulsos de ar comprimido na direção oposta da filtração produzindo uma pressão necessária no meio para inverter o sentido do fluxo, causando

expansão das mangas, fratura da torta e remoção do pó do meio filtrante (CHEREMISINOFF, 2002). A Figura 2.14 ilustra o esquema da técnica de pulso de ar reverso.

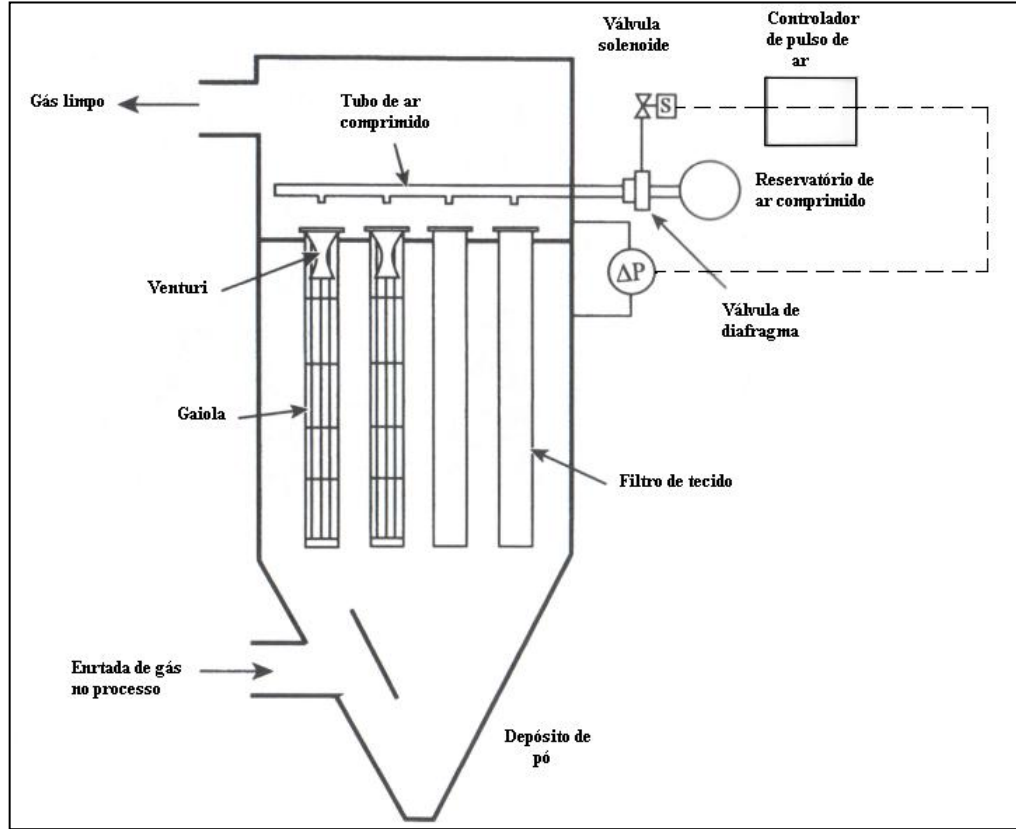


Figura 2.13: Mecanismo de limpeza por pulso de ar reverso (BROWN et al., 2002)

## 2.6- Variáveis importantes no processo de filtração

### 2.6.1- Queda de pressão no sistema de filtração

A queda de pressão total de um filtro manga é definida como a soma das quedas de pressão no meio filtrante,  $\Delta P_m$ , na torta formada,  $\Delta P_c$ , e na estrutura do filtro da manga  $\Delta P_s$ . Como esta é muito baixa, pode-se considerá-la desprezível. Logo, a pressão total é estimada pela Equação (2.14).

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_c + \Delta P_s \quad (2.13)$$

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_c \quad (2.14)$$

### 2.6.2- Queda de pressão no meio filtrante

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

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \alpha_m \mu_g V_f \quad (2.15)$$

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

$$\Delta P_m = \frac{L_m V_f}{B_m} \quad (2.16)$$

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

$$\Delta P_m = k_m V_f \quad (2.17)$$

### 2.6.3- Queda de pressão através da camada de pó

Neste caso, diferentemente do que ocorre com o meio filtrante, a espessura da torta ( $L_c$ ) varia com o tempo de filtração. É possível determinar tal espessura através da seguinte equação, conforme AGUIAR (1991).

$$L_c = \frac{W}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.18)$$

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

$$\Delta P_c = \frac{WV_f}{[\rho_p (1 - \varepsilon)] B_c} \quad (2.19)$$

em que  $B_c$  é o coeficiente de permeabilidade da torta. Fazendo  $k_c = \frac{1}{[\rho_p (1 - \varepsilon)] B_c}$ , a resistência específica da torta.

Substituindo as equações (2.17) e (2.19) na Equação (2.14), obtém-se:

$$\Delta P_T = k_m \cdot V_f + k_c \cdot V_f \cdot W \quad (2.20)$$

Portanto, a queda de pressão é um parâmetro fundamental na operação de filtração, porque, é responsável em determinar a frequência de limpeza do meio filtrante, além de determinar a potência requerida pelo sistema de filtração (JEON; JUNG, 2004) apud ROCHA (2010).

TSAI & CHENG (1998) analisaram os fatores que influenciam a queda de pressão através da torta de filtração durante a operação de filtração utilizando como materiais pulverulentos cinzas, calcário e poeira fina SAE com diâmetros aerodinâmicos 6,28, 2,53 e 3,88  $\mu\text{m}$  e velocidades de filtração de 1 a 9 cm/s. Os autores concluíram que altos valores de velocidades de filtração resultam em uma maior quantidade de torta compactada irreversível e menor quantidade de torta elástica compactada e que o coeficiente de resistência específica de tortas de filtração aumentava à medida que aumentava a velocidade de filtração.

#### 2.6.4- Permeabilidade do meio filtrante

De acordo com Innocentini et al. (2009) a permeabilidade do meio filtrante ( $k_1$ ) é uma das variáveis fundamentais na operação de filtração e que pode ser definida como sendo uma propriedade do meio poroso que determina a facilidade com que um fluido submetido a um gradiente de pressão de atravessa os poros ou vazios do meio filtrante. Essa passagem do

fluido ao meio filtrante acarretará em uma perda de energia que é refletida na forma de queda de pressão na entrada e saída do meio filtrante. A permeabilidade pode ser estimada através de duas relações empíricas, equações de Darcy e de Forchheimer, que relacionam a queda de pressão no meio filtrante com a velocidade superficial. A equação de Darcy quantifica a resistência ao escoamento de um fluido para baixas velocidades através de meios porosos granulares, homogêneos e incompressíveis (INNOCENTINI et al, 1999). A primeira relação empírica é dada por:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{k_1} V_f \quad (2.21)$$

Sendo  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  espessura do meio filtrante,  $k_1$  permeabilidade darciana,  $V_f$  velocidade de filtração e  $\mu_g$  viscosidade do gás.

Outra equação utilizada para a determinação da permeabilidade do meio filtrante é conhecida como equação de Forchheimer aplicada a fluidos compressíveis (gás ideal) em que a queda de pressão através do meio poroso descreve uma relação não linear com a velocidade superficial do fluido. Essa equação é composta pelos termos de forças viscosas e forças inerciais, respectivamente. A correlação a seguir é conhecida como equação de Forchheimer:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{k_1} V_f + \frac{\rho_g V_f^2}{k_2} \quad (2.22)$$

sendo  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  a espessura do meio filtrante,  $k_2$  a permeabilidade não darciana,  $V_f$  a velocidade de filtração,  $\mu_g$  a viscosidade do gás e  $\rho_g$  a densidade do gás.

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

#### 2.6.5- Velocidade superficial de filtração

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

Velocidades de filtração altas acarretam na maior penetração de particulados no meio filtrante, reduzem o tamanho da área de filtração, dificultam na operação de limpeza, tornando mais difícil a remoção de tortas de filtração e, como consequência, aumentam a queda de pressão na operação de filtração e diminui a vida útil do tecido menor. Em contrapartida, com a redução da área de filtração têm-se um custo inicial, operacional e de manutenção menores. Para baixos valores de velocidades de filtração, há maior consumo de energia devido maior tempo para penetração das partículas (DONOVAN, 1985).

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

SILVA NETO, et al 1999 estudaram a influência das velocidades do gás na formação e remoção das tortas de filtração, utilizando como meio filtrante o feltro de poliéster e uma área para filtração de  $0,0225 \text{ m}^2$ . Foram especificados quatro valores para velocidade de filtração: 0,048; 0,067; 0,074 e 0,089 m/s. Para cada velocidade de filtração estudada, analisaram a espessura da torta formada, adotando como método para remoção das partículas o fluxo de ar reverso, e a força de adesão foi estimada. Nesse trabalho, os autores concluíram que a porosidade média da torta de filtração diminui e a resistência específica da torta aumentou com o aumento da velocidade de superficial de filtração e que o tamanho médio das partículas que formaram a torta aumentou com o acréscimo da velocidade superficial de filtração, provavelmente devido à sedimentação das partículas antes de chegar ao filtro. Concluíram também, que a força de adesão da torta de filtração aumentou e que a distância efetiva estimada entre as partículas e a superfície diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração.

LUCAS (2000) estudou a influência das variáveis operacionais e o tipo de material pulverulento (rocha fosfática, talco e polvilho) na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos em três diferentes tecidos para velocidades de filtração de 6, 9 e 11 cm/s, quatro quedas de pressões máximas de 400, 500, 600 e 700 mmH<sub>2</sub>O, duas vazões de pó e como método de limpeza por fluxo de ar reverso. O autor concluiu que a porosidade

média diminui com o aumento da velocidade superficial de filtração para a rocha fosfática e que a resistência específica da torta aumentou com o aumento da velocidade para todos os tipos de materiais e que a tensão de remoção em relação à rocha fosfática e ao talco aumentou com o aumento da velocidade e da vazão de pó e para o polvilho diminui.

KRAMMER & SALEEM (2007) estudaram os efeitos da velocidade de filtração e concentração de pó na formação da torta para filtros de mangas em escala piloto com limpeza por jato pulsante utilizando um sistema óptico para determinar a espessura da torta na superfície do filtro e simulação unidirecional para a operação de filtração. Como mecanismo de limpeza, utilizaram o jato de ar pulsante. Concluíram que a concentração de material particulado tem pouca influência na operação de filtração a uma velocidade superficial de filtração constante. No entanto, a velocidade de filtração tem um efeito mais pronunciado em relação à concentração de pó na queda de pressão, na resistência específica da torta e a densidade, no qual, abordaram que o aumento da velocidade filtração proporcionou maiores resistências específicas e densidades de tortas de filtração em concentrações de pó constantes e que o efeito da concentração de pó é pequeno na densidade e resistência específica da torta.

CHEN & HSIAU (2009b) estudaram a influência da velocidade superficial de filtração na formação e compressão da torta de filtração. Investigaram a espessura da torta, a eficiência de coleta e queda de pressão em diferentes velocidades superficiais de filtração (10, 15, 20, 25, 30,35 e 40 cm/s). Com isso, perceberam nos resultados que, um aumento da queda de pressão de 1 mmH<sub>2</sub>O resultaria na diminuição de 0,001 na porosidade da torta e no aumento de 0,11% na eficiência de captura de partículas. Concluíram também que a porosidade da torta diminui e a resistência específica da torta e eficiência de coleta aumentam com o aumento da tensão de compressão da torta de filtração e que isso também acontece à medida que aumenta a velocidade de filtração.

#### **2.6.6- Porosidade da torta de filtração e do meio filtrante**

Para a determinação da porosidade da torta de filtração têm-se dois métodos que podem ser aplicados. Um dos métodos utilizados é o denominado Método Indireto em que a porosidade da torta e do meio filtrante são determinadas através de correlações clássicas presentes na literatura, que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido (TOGNETTI, 2007) e o outro método, conhecido como Método Direto, que consiste no preparo de uma camada de torta que é analisada em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (AGUIAR, 1995) ou em um Microscópio Óptico (MO) (ITO, 2002)



### 2.6.7- Porosidade média das tortas de filtração através do método indireto

Uma das equações clássicas que podem vir a ser utilizadas para determinar a perda de carga através da deposição da torta sobre um meio filtrante é dada pela equação de Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_g V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (2.23)$$

em que  $\mu_g$  é a viscosidade do gás,  $V_f$  é a velocidade superficial do fluido,  $d_p$  é o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes),  $L$  é a espessuras da torta,  $\rho_g$  é a densidade do gás e  $\varepsilon$  é a porosidade. A primeira parcela do segundo membro da Equação (2.23) se refere aos termos viscosos e a segunda ao componente inercial. Quando a filtração ocorre a baixos valores de Reynolds escoamento é puramente viscoso, desprezando-se a parcela inercial. Assim, a equação (2.23) pode ser simplificada para:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_g V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (2.24)$$

Através da equação (2.24) é possível determinar a porosidade da torta de filtração, uma vez que, com a sua formação esta passa a exercer o papel de meio filtrante.

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

$$M = Q.t = L.A.\rho_p(1-\varepsilon) \quad (2.25)$$

em que,  $M$  é a massa da torta,  $Q$  é a vazão mássica de pó,  $A$  é a área superficial da torta,  $\rho_p$  é a densidade das partículas e  $t$  é o tempo de filtração. Isolando-se  $L$  na Equação (2.25) têm-se:

$$L = \frac{Q.t}{A\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.26)$$

Substituindo a Equação (2.26) na Equação (2.24) obtém-se:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1-\varepsilon) \mu_g Q V_f}{\varepsilon^3 \rho_p d_p^2} \quad (2.27)$$

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

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

$$\Delta P = \frac{18 \mu_g V_f Q t}{A d_p^2 \rho_p C'} + \frac{2 K_{CK} (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.28)$$

em que,  $\Delta P$  é a queda de pressão,  $\mu_g$  é a viscosidade do gás,  $V_f$  é a velocidade superficial do fluido,  $Q$  é a vazão mássica de pó,  $d_p$  o diâmetro médio das partículas,  $\rho_p$  a densidade das partículas,  $C'$  é o fator de correção de Cunningham,  $K_{CK}$  é uma constante empírica que pode assumir valores de 4,8 para partículas esféricas e de 5,0 para partículas irregulares (LUCAS, 2000). A determinação do fator de correção de Cunningham é dada pela equação:

$$C' = \left\{ 1 + \frac{2\lambda}{d_p \left[ 1,275 + 0,4e^{\left( \frac{-1,10d_p}{2\lambda} \right)} \right]} \right\} \quad (2.29)$$

em que  $\lambda$  é o livre percurso médio das moléculas do gás.

Na Equação de Rudnick-Happel adota-se para o cálculo do fator de resistência o modelo de célula de superfície livre em que a célula é a partícula associada ao volume de

vazios no qual se assume algumas hipóteses: as partículas são esféricas, o volume da célula igual ao da partícula associada à porosidade do meio e o cisalhamento na interface entre células é nulo (AGUIAR, 1995). Assumindo essas hipóteses e considerando que os termos inerciais da equação de Navier-Stokes são desprezíveis obtêm-se uma correlação para a queda de pressão em função do tempo de filtração que permite determinar a porosidade da torta de filtração.

$$\Delta P = \left[ \frac{3 + 2(1 - \varepsilon)^{\frac{5}{3}}}{3 - 4,5(1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} + 4,5(1 - \varepsilon)^{\frac{5}{3}} - 2(1 - \varepsilon)^2} \right] \cdot \frac{18\mu V_f Q t}{A \rho_p d_p^2 C'} \quad (2.30)$$

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

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

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180(1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{4(1 - \varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.31)$$

e

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180(1 - \varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,8(1 - \varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.32)$$

#### 2.6.8 – Porosidade média das tortas de filtração através do método direto

Outra forma de calcular a porosidade da torta de filtração é a adoção do método direto. Esse método trata-se de um procedimento experimental que consiste em obter informações quantitativas da porosidade de tortas de filtração de gases a partir de análise de suas imagens. Essa técnica foi adaptada por AGUIAR (1995) e é composta pelas seguintes etapas: pré-endurecimento, embutimento do tecido, seccionamento, esmerilamento, polimento e análise de imagens.

Primeiramente, a camada de pó ou torta de filtração passa pelo processo de pré-endurecimento com um adesivo instantâneo arrastado por ar úmido. Esse processo garante a estabilidade da torta, permitindo, na etapa posterior, a penetração de uma resina embutidora na estrutura, sem danificar a camada de pó, preenchendo todos os seus poros.

Após o endurecimento da torta, há o seccionamento da mesma em cubos de  $1\text{cm}^2$  que são introduzidos em moldes de PVC composto por uma resina termo rígida. Finalmente, as tortas endurecidas são levadas para um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para a obtenção de imagens na seção transversal das tortas e, posteriormente, analisadas em programas específicos para análise das imagens. As imagens podem ser vistas em níveis de cores diferentes: área de pontos brancos (partículas) e pontos escuros (espaços vazios). As microfotografias emitidas pelo aparelho eletrônico devem possuir um contraste adequado para que os resultados aproximassem da realidade.

## 2.6.9 – Trabalhos relevantes sobre porosidade de tortas de filtração

SILVA NETO et al. (2002) desenvolveram um trabalho no qual estudaram a porosidade de tortas de filtração de gases em filtro de manga utilizando como material pulverulento o concentrado fosfático e meio filtrante como o feltro de poliéster gramatura de  $500\text{ g/m}^2$ . Os autores determinaram a porosidade de tortas de filtração através dos métodos direto e indireto nas seguintes condições de operação: sistema de filtração constituído de uma casa de filtros com uma unidade filtrante de área livre de filtração de  $5820\text{ cm}^2$  no qual o meio filtrante foi cortado em cilindros de 15 cm de diâmetro de 1,23m de comprimento, vazão mássica de 0,045 g/s em que o pó tinha uma densidade de partícula de  $29\text{ }\mu\text{m}$ , umidade relativa do ar constante em 20%, velocidade de filtração de 5,10 e 15 cm/s até atingir queda de pressão de 100 mm  $\text{H}_2\text{O}$ , espessura da torta de 62 a  $1450\text{ }\mu\text{m}$  ao longo do filtro 30, 60 e 90 cm do fundo do filtro, parte interior do filtro, centro do filtro e parte superior do filtro, respectivamente. Os autores puderam concluir que as microfotografias das tortas de filtração ao longo do filtro viabilizaram o cálculo da porosidade indicando uma pequena diferença na deposição das partículas ao longo do filtro e uma diferença sensível na espessura da torta formada que diminuiu do fundo ao topo do filtro devido à segregação gravitacional das partículas antes da deposição e valores bastante distintos de porosidade calculados pelo método experimental ou direta e o método indireto.

MATUGI et al. (2009) estudaram a porosidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido utilizando como parâmetros, a velocidade superficial de filtração constante a

10m/s para quatro quedas de pressão (100, 300, 600 e 900mmH<sub>2</sub>O). O material particulado utilizado foi o concentrado fosfático com densidade de partícula igual a 3,2 g/cm<sup>3</sup>, diâmetro médio de partícula de 5,6 µm e como meio filtrante foi utilizado o feltro de poliéster tratado com gramatura de 600g/m<sup>2</sup>. Para a obtenção da porosidade média de tortas de filtração foi utilizada a correlação de Ergun modificada tendo como resultados de porosidade média 0,54, 0, 50, 0,46 e 0,50 para cada queda de pressão acima, respectivamente. Nos resultados obtidos verificaram que o aumento da queda de pressão representa maior tempo de pressão e massa de pó depositada por unidade área. Em relação à porosidade de tortas de filtração concluíram que a porosidade diminuía à medida que aumentava a massa de pó depositada (tempo) variando de 0,66 a 0,44 e que a porosidade média estimada para as quatro quedas de pressão diminuía inicialmente com o aumento da massa de pó depositada variando de 0,54 a 0,46 e em seguida aumentava para 0,50, comportamento também observado por Negrini et al (2001).

ITO; AGUIAR (2009) desenvolveram um trabalho sobre um estudo da porosidade de tortas de filtração de gases utilizando três tipos de materiais pulverulentos sendo o concentrado fosfático, o polvilho doce e o amido de milho para a dispersão do ar com diferentes densidades e diâmetros médios de partícula. O meio filtrante utilizado foi um feltro de poliéster de 534 g/m<sup>2</sup> e uma área de filtração de 256 cm<sup>2</sup>, para velocidades de filtração de 5, 7, 5, 10, 12,5 e 15cm/s com tempo de duração de filtração de 800 segundos e vazões mássicas de 0,03 g/s, 0,02 g/s e 0,04 g/s para o polvilho doce, amido de milho e rocha fosfática, respectivamente. Estimaram a porosidade média utilizando o método direto desenvolvido por Aguiar (1995). Os resultados encontrados revelaram que a porosidade diminuía à medida que a velocidade superficial de filtração aumentava e que a porosidade média do amido de milho (0,59 à 0,66) e da porosidade do concentrado fosfático (0,59 à 0,63) foram mais altos que a porosidade do polvilho doce (0,48 à 0,54). Esse comportamento é devido ao formato das partículas, da distribuição granulométrica e características físico-químicas. Os autores ajustaram correlações que melhor relacionassem os dados de porosidade média de tortas de filtração de gases e a velocidade superficial de filtração, sendo  $\varepsilon = 1 - 0.38 V_f^{0.11}$ ,  $\varepsilon = 1 - 0.26 V_f^{0.17}$  e  $\varepsilon = 1 - 0.32 V_f^{0.09}$ , para o polvilho doce, amido de milho e concentrado fosfático, respectivamente.

---

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

---

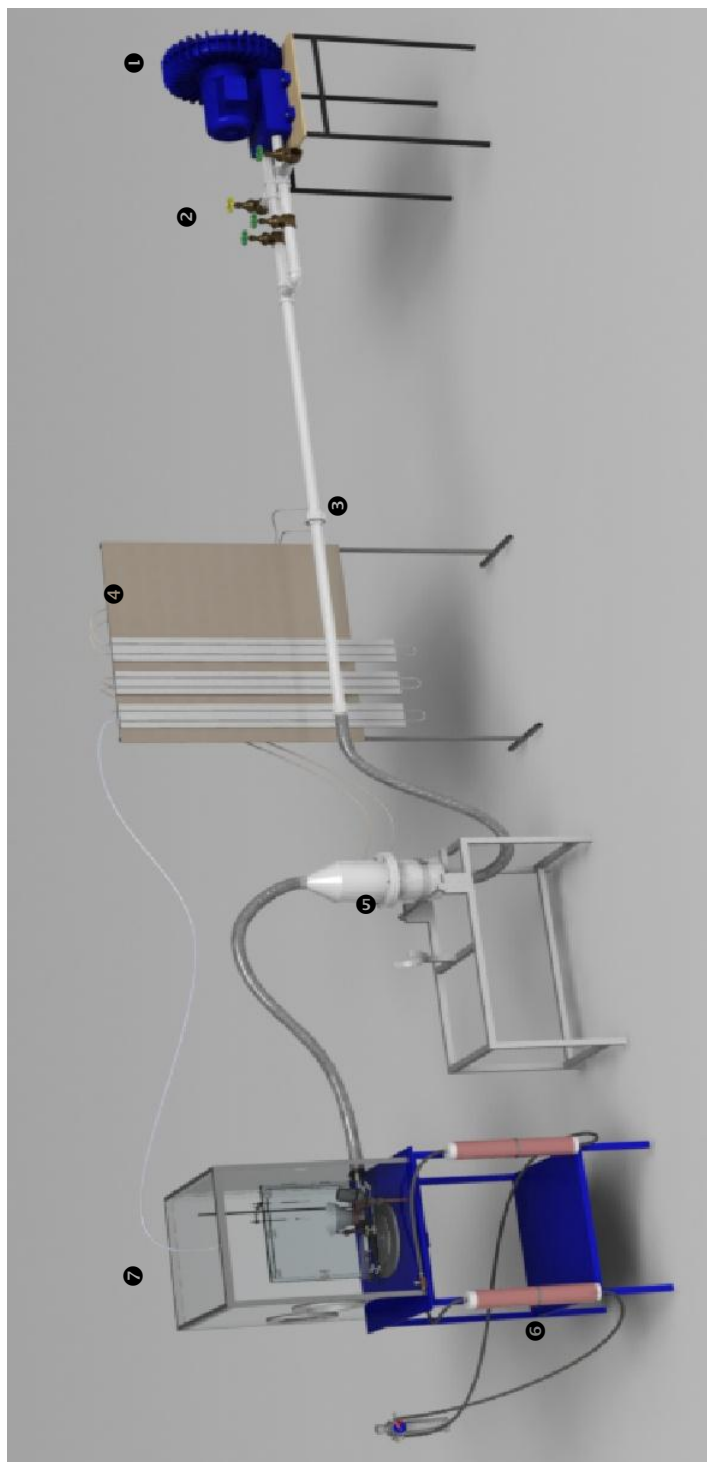
Neste capítulo serão descritos todos os equipamentos necessários para a construção da linha de filtração de gases por filtro de tecidos e sua forma de execução. Será abordado o funcionamento de cada equipamento, o tipo de material particulado empregado, tipos de tecidos ou meios filtrantes utilizados, técnica de limpeza e a metodologia aplicada para o estudo das variáveis que influenciam no processo de filtração e limpeza do filtro.

#### 3.1 – A unidade experimental

A unidade experimental utilizada para a execução dos experimentos de filtração e limpeza pertence ao Laboratório de Processos de Separação (LabSep) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A Figura 3.1 apresenta o sistema experimental construído para a realização dos experimentos, que é constituído pelos seguintes dispositivos:

1. Compressor radial do tipo WEG *Plus* da marca IBRAM de 5,5 HP (7,5 cv);
2. “Comando de válvulas gaveta do tipo DN 50 da marca Deca de 2 polegadas de diâmetro para ajuste de vazão de ar;
3. Calibração da placa de orifício de aço inoxidável para determinação da velocidade de ar;
4. Manômetros diferenciais utilizando água como líquido manométrico conectados à placa de orifício e à caixa de filtração e suporte;
5. Caixa de filtração com área de filtração de 314,16 cm<sup>2</sup> e suporte;
6. Colunas de desumidificação composta por sílicas em gel;
7. Caixa acrílica de desumidificação composta por um motor vibratório, prato giratório, cone de alimentação de pó, psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido,
8. Linhas de ar comprido conectadas às colunas de sílicas em gel;
9. Filtro processador de ar e regulador de pressão da marca CENTURIUM com entrada de 5/16 polegadas BSP fêmea e duas saídas de ar reguláveis de 5/16 polegadas BSP macho e manômetro de 175 lbs/pol<sup>2</sup>.

A unidade experimental de filtração de gases foi construída para o desenvolvimento do presente trabalho.



❶ - Soprador    ❷ - Válvulas gavetas    ❸ Placa de orifício    ❹ Manômetros    ❺ Caixa de filtração    ❻ Colunas desumidificadoras    ❼ Gerador de pó

Figura 3.1: Diagrama esquemático da unidade experimental.

### 3.1.1 - Sistema de alimentação de pó

O sistema construído para promover a alimentação de pó na linha de filtração (gerador de pó) era composto por um prato giratório de aço inoxidável de 24,5 cm de diâmetro com sulcos com seção semicircular, no qual a rocha fosfática era depositada. Havia um sistema de descarga que permitia a deposição de material particulado no prato giratório.

Tal sistema de descarga era constituído por um cone de alimentação do pó, motor vibratório, nivelador de pó, um sugador de pó do tipo Venturi, uma válvula reguladora de pressão ou filtro regulador (ar comprimido), um coletor para recuperação do pó em excesso ao sulco do prato giratório, duas colunas de tubo de PVC contendo sílica gel, controlador de velocidade máxima de rotação do prato, um psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido, potes com sílicas gel e uma caixa acrílica 80 x 62,5cm. O sistema de alimentação de pó é ilustrado na Figura 3.2.

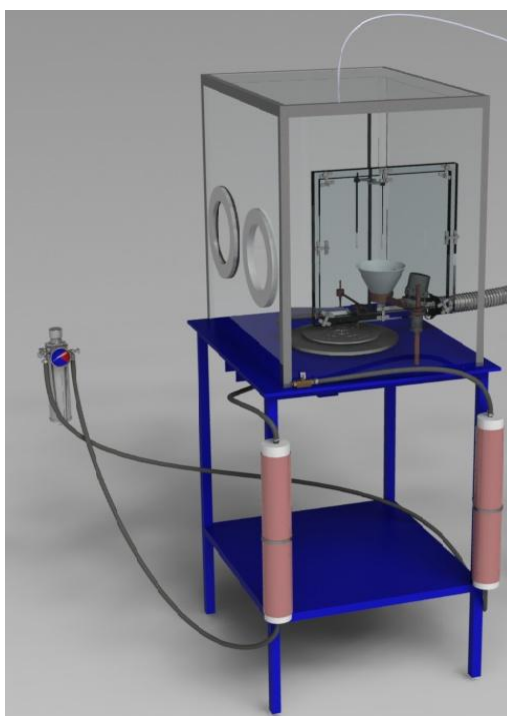


Figura 3.2: Sistema de alimentação de pó.

O material pulverulento era alimentado através do cone de alimentação que preenchia o sulco semicircular do prato que girava em torno de seu eixo, impulsionado pelo motor dotado de controle de velocidade, que possibilitava controlar a alimentação de pó.

Para permitir o melhor deslocamento do material pulverulento fixou-se um motor vibratório ao cone, evitando o acúmulo e aglomeração das partículas no mesmo e um



nivelador sobre o prato para garantir o total preenchimento do sulco semicircular do prato giratório, garantindo uma alimentação homogênea.

Um sugador de pó do tipo Venturi era alimentado por ar comprimido e succionava permanentemente o pó presente no sulco para a corrente de ar gerada pelo soprador. O tubo de sucção possuía um diâmetro de ¼ polegadas.

Havia duas colunas de sílica gel acopladas ao sistema de geração de pó que eram responsáveis por retirar a umidade do ar comprimido e uma caixa acrílica totalmente vedada que isolava o material particulado do meio externo. Com este aparato, era possível reduzir a umidade relativa do ar a um à faixa entre 8 e 20%. Vasilhas com sílica gel dentro da caixa foram colocadas para aumentar o controle da umidade relativa do ar no seu interior.

A medida da umidade relativa do ar era feita utilizando um higrômetro no meio externo e um psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido no interior da caixa de acrílico em que foram realizados testes de comparação de temperatura e umidade anteriormente aos experimentos para verificar a variação de um equipamento ao outro.

### **3.1.2 - Caixa de filtração**

A caixa de filtração era o local em que acontecia a operação de filtração, como pode ser visto isoladamente na Figura 3.3:



Figura 3.3: Esquema da caixa de filtração.

Este equipamento era constituído por dois cilindros de PVC de 20 cm de diâmetro e duas tampas cônicas. O meio filtrante circular possuía uma área livre para filtração de  $314,16\text{cm}^2$  e diâmetro de 20 cm. O tecido era colocado e parafusado entre duas molduras de PVC acondicionadas entre os dois cilindros.

Para estabelecer a conexão entre as tampas e as molduras e manter o filtro fixo dentro da caixa utilizou-se 7 parafusos de  $\frac{1}{4}$  polegada de 7cm de comprimento, 7 porcas e 7 arruelas para a montagem e desmontagem do filtro durante os experimentos.

A caixa de filtração possuía duas tampas cônicas com dutos de 2 polegadas em suas extremidades, sendo que a extremidade superior foi conectada ao gerador de pó por uma mangueira rugada de 2 polegadas.

A outra extremidade foi conectada ao tubo de PVC de 2 polegadas de diâmetro através de uma mangueira da mesma medida conectada, posteriormente, ao soprador, que por sua vez, por meio de um conjunto de válvulas determinava a vazão de ar.

O filtro era mantido sobre um módulo-suporte móvel que permitia posicionar o filtro tanto na vertical, posição para a operação de filtração, quanto na horizontal, posição para a operação de limpeza do filtro. A figura 3.4 ilustra a caixa de filtração durante a operação de filtração e limpeza, respectivamente.

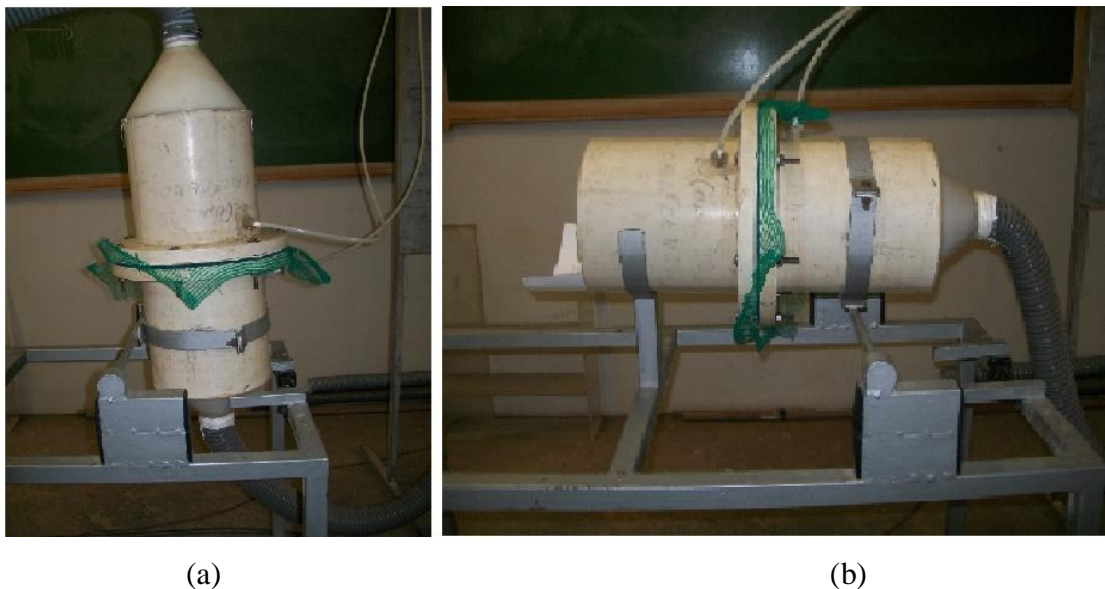


Figura 3.4: Esquema da caixa de filtração: a) processo de filtração e b) processo de limpeza.

### 3.1.3- Direcionamento do escoamento

O equipamento utilizado para garantir o escoamento de ar através da caixa de filtração e realizar as funções de sucção do gás no processo de filtração e também soprá-lo no processo de limpeza foi um soprador do tipo WEG *Plus* da marca IBRAM com 5,5 HP (7,5 cv). Em conexão com o soprador foi utilizado um tubo de PVC de 2 polegadas conectado a 4 válvulas do tipo gaveta também de 2 polegadas de diâmetro que possibilitava o controle do fluxo de ar.

Na tubulação de PVC, entre a caixa de filtração e as válvulas, colocou-se uma luva de união de 2 polegadas com uma placa de orifício previamente calibrada no seu interior para a determinação da velocidade do ar. Tomadas de pressão a jusante e a montante da placa de orifício foram colocadas de modo a propiciar medidas da velocidade de filtração em um manômetro tipo U.

Na operação de filtração de gases, o direcionamento do escoamento se dava da seguinte forma: às válvulas 1, 3 e 4 (ver Figura 3.5) eram abertas completamente e a válvula 2 era mantida totalmente fechada. A válvula 4 era utilizada para controlar (manualmente) e manter constante a velocidade superficial do ar no filtro, visto que à medida que se executava a operação de filtração a velocidade diminuía.

Na operação de limpeza, as válvulas 3 e 4 mostradas na Figura 3.5 eram utilizadas para ajustar a velocidade de ar, sendo que à válvula 3 era parcialmente aberta e à válvula 4 totalmente aberta. As válvulas 1 e 2 eram mantidas fechadas à priori, sendo que a válvula 2 era aberta cuidadosamente até atingir a velocidade de limpeza desejada.

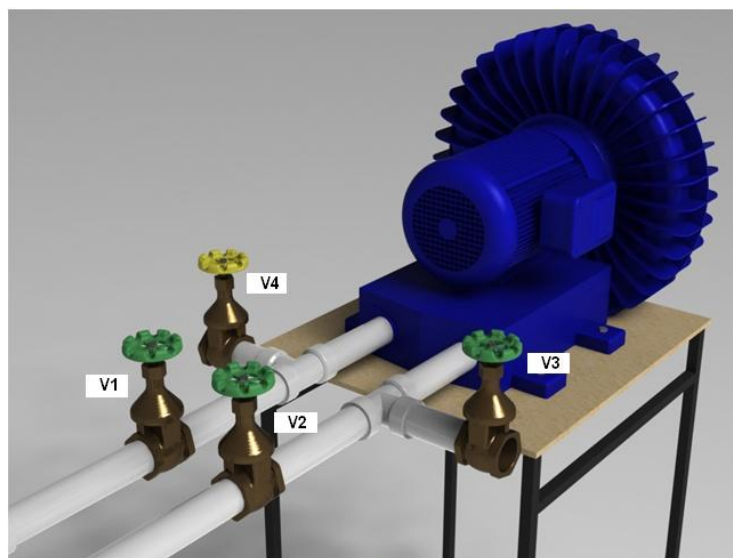


Figura 3.5: Direcionamento do fluxo de gás e comando de válvulas.

### 3.1.4 - Medição de vazão e queda de pressão

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

A determinação da vazão do gás nesses processos foi realizada através de uma placa de orifício conectada ao manômetro do tipo U localizado entre a saída da caixa de filtração e do soprador, conforme já abordado.

A Figura 3.6 apresenta uma vista esquemática do sistema de manômetros utilizados neste trabalho.

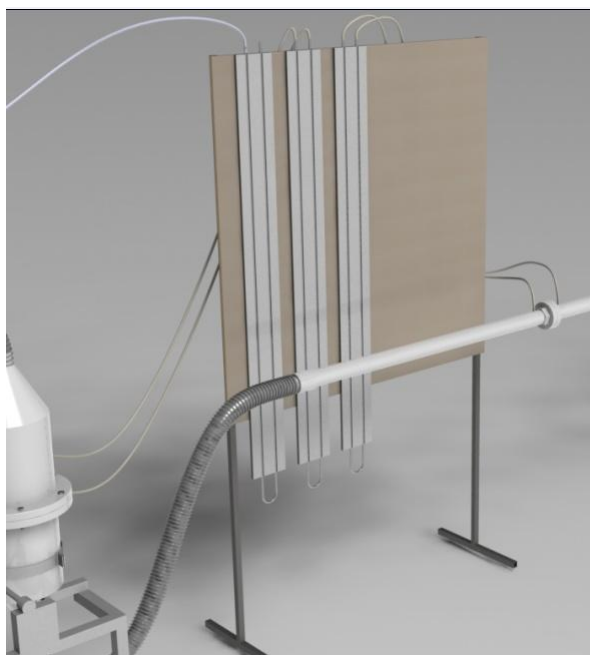


Figura 3.6: Manômetro diferencial do tipo U.

### 3.1.5 – Medição da umidade

A umidade relativa do ar no interior da caixa de acrílico foi medida utilizando um psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido que era composto por dois termômetros previamente calibrados fixados sobre um mesmo suporte e presos por garras.

A falta de controle da umidade relativa do ar faz com que ocorra aglomeração das partículas do pó utilizado sobre a superfície do tecido, fenômeno denominado de empastamento, resultando em maior obstrução da passagem do gás, devido aumento da

resistência específica da torta e dificuldade de limpeza (TOGNETTI, 2007) e (BARROS, 2010).

### 3.2 – Outros itens

Além dos equipamentos mencionados anteriormente outros materiais também foram utilizados, tais como: placas planas de aço inoxidável com orifício central de 8mm (filtração) e 10 mm (limpeza) de diâmetros, dessecadores de vidro, uma estufa de secagem sem circulação de ar da marca *MedClave* modelo 5, uma balança analítica com 4 casas de precisão da marca *SHIMADZU* modelo AY220, um anemômetro *VelociCalc Portable Air Velocity Meter* marca *TSI Incorporated* modelo 8346 utilizado para a calibração das placas de orifício, um cronômetro da marca *CRONOBIO SW 2018* para medição do tempo de filtração.

### 3.3 - Material pulverulento

O material particulado utilizado para a realização dos experimentos foi a rocha fosfática disponibilizada pela empresa FOSFÉRTIL - Fertilizantes Fosfatados S.A. originária da cidade de Patos Minas (MG).

A amostra necessária para fazer a caracterização do sólido passou pelos procedimentos de quarteamento manual e mecânico, no qual, a amostra era homogeneizada e quarteada, sendo que dois quartis opostos eram selecionados para formar uma nova amostra e homogeneizada e os outros dois eram descartados.

Esse procedimento foi realizado até obter uma massa aproximada de 1,0 a 1,2 Kg para realizar o quarteamento através do quarteador de Jones. A amostra foi quarteada até obter, ao final, quatro amostras de aproximadamente 250g à 300g.

Uma dessas quatro amostras foi colocada em uma bandeja e encaminhada a uma estufa a 105 °C durante 24 horas para secagem do material. Após esse período, a amostra foi colocada em um dessecador e mantida até esfriar totalmente.

Em seguida, determinou-se a densidade da amostra de pó de rocha fosfática através da picnometria a Hélio com o auxílio do equipamento ACCUPYC 1330, da Micromeritics, no qual se obteve o valor resultante da massa específica de  $(2,898 \pm 0,009) \text{ g/cm}^3$ .

A Figura 3.9 apresenta uma vista do procedimento manual e mecânico de quarteamento.

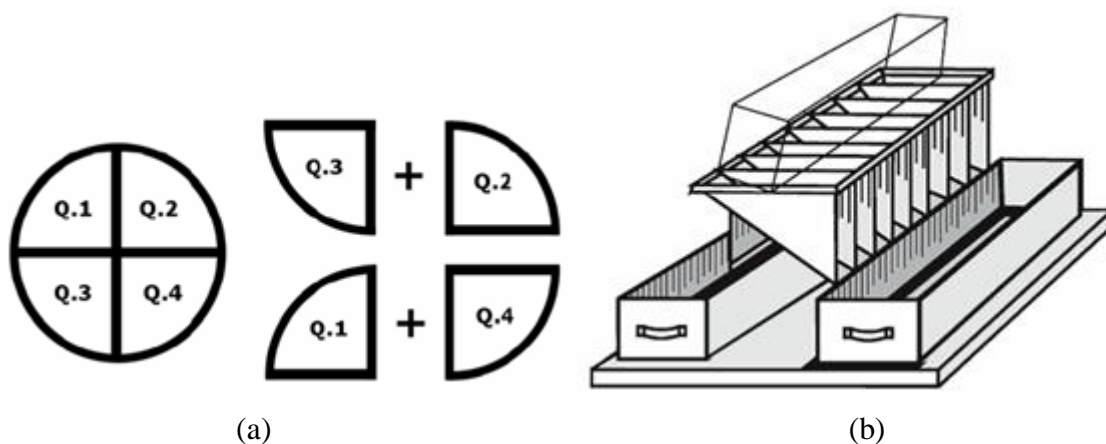


Figura 3.7: (a) Quarteamento manual e (b) Quarteador tipo Jones

A distribuição granulométrica da rocha fosfática foi obtida através da técnica de difração de raios *laser*, utilizando o equipamento *Malvern Mastersizer Microplus MAF 5001*® no Laboratório de Caracterização de Partículas da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

A distribuição granulométrica da rocha fosfática era fornecida através do software do equipamento analisador de tamanho de partículas com os diâmetros de partículas e suas frações cumulativas. Os parâmetros estatísticos mostrados no boletim de resultados fornecidos pelo equipamento eram:

- a)  $D_{(4,3)}$ : conhecido como diâmetro volumétrico no qual corresponde ao diâmetro da esfera de mesmo volume médio das partículas estudadas;
- b)  $D_{(3,2)}$ : também conhecido como volume de *Sauter* ou superficial no qual corresponde ao diâmetro da esfera de mesma área superficial média das partículas estudadas;
- c)  $D_{(0,1)}$  e  $D_{(0,9)}$ : correspondem aos diâmetros que dividem a distribuição granulométrica das partículas em 10% e 90% do volume total, respectivamente;
- d)  $D_{(0,5)}$ : corresponde ao diâmetro da mediana em que corta a distribuição granulométrica das partículas em 50% do volume total das partículas;
- e) Obscuração (*Obscuracion*): medição relacionada à concentração de partículas e que de acordo com o fabricante, a concentração deve estar entre 10 e 30%. Valores abaixo significam que há uma diminuição na precisão das medidas e valores acima podem ocorrer efeito de difração múltipla

- f) Residual: representa a diferença entre a intensidade de energia refratada fornecida pelo equipamento e a intensidade de energia obtida a partir da distribuição de tamanho de partículas, no qual, segundo o fabricante essa diferença deve ser de 0 e 1%. (RAMALHO;OLIVEIRA (1999))

Utilizando o *software* STATISTICA<sup>®</sup> 7.0 fez-se uma regressão não-linear da distribuição granulométrica, estimando os parâmetros para o modelo de distribuição de partículas *Rosin-Rammler-Bennett* (RRB) resultando em:

$$X = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{d_p}{d_{63,2}} \right)^n \right] \quad (3.1)$$

em que,  $X$  representa a fração cumulativa de diâmetros inferiores a  $d_p$ ,  $d_p$  diâmetro das partículas,  $d_{63,2}$  e  $n$  os parâmetros estimados. A Figura 3.10 apresenta o gráfico de tal distribuição.

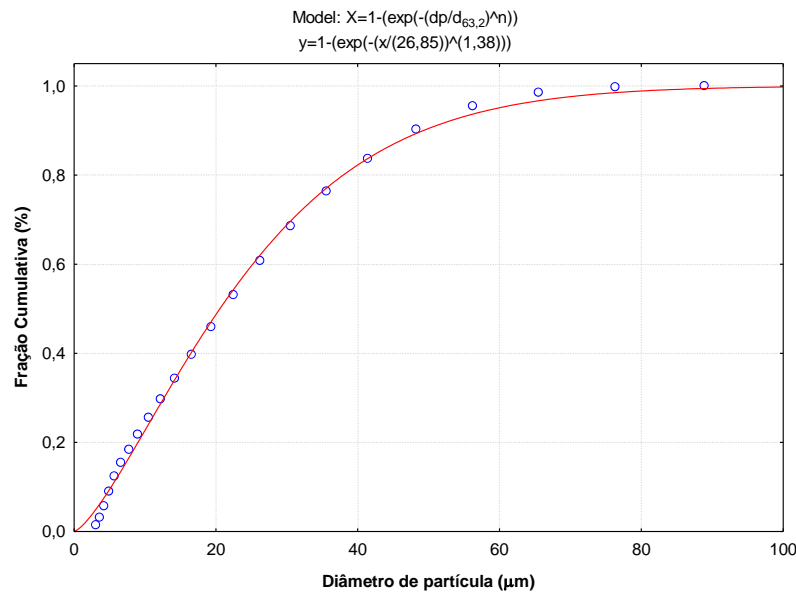


Figura 3.8: Distribuição granulométrica fornecida pelo modelo RRB.

A Tabela 3.1 apresenta os resultados da regressão, com o quadrado do coeficiente de correlação, desvio padrão e os parâmetros para o modelo. A Tabela 3.2 apresenta os valores de alguns diâmetros característicos do mesmo material.

Tabela 3.1– Resultados da regressão para distribuição de diâmetros de pó segundo modelo RRB.

Fração (#)	Amostra	Resultado da Regressão		
Tyler -325	Concentrado fosfático (26% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	r <sup>2</sup>	0,999	
		Parâmetro Ajustado	d <sub>63,2</sub> (µm)	N
		Valor	26,85	1,38
		Desvio Padrão	0,30	0,02

Tabela 3.2– Diâmetro da rocha fosfática por difração de raio laser.

Metodologia	D <sub>(0,1)</sub> (µm)	D <sub>(0,5)</sub> (µm)	D <sub>(0,9)</sub> (µm)	D <sub>(3,2)</sub> (µm)	D <sub>(4,3)</sub> (µm)
Difração de Raios Laser	5,09	21,08	47,89	12,72	24,09

### 3.4 - Caracterização dos meios filtrantes

Para os ensaios de filtração e limpeza foram selecionados três tipos de tecidos empregados na fabricação de filtros de mangas industriais fornecidos pela empresa fabricante Gino Cacciari, originária da cidade de São Paulo (SP).

Tais tecidos eram constituídos pelo polipropileno, poliéster e acrílico. Os tecidos sofreram tratamentos de chamuscagem e calandragem em um de seus lados com o intuito de facilitar o desprendimento das tortas de filtração durante o processo de limpeza. Os tratamentos citados foram realizados pelo próprio fabricante. A Tabela 3.3 apresenta algumas características destes tecidos.

Os materiais filtrantes foram cortados de acordo com a caixa de filtração que possui 20 cm de diâmetro e área de filtração de 314,16 cm<sup>2</sup>.

Tabela 3.3- Características e especificações dos meios filtrantes fornecido pela Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros de Tecidos Ltda.

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



### 3.5 - Calibração do gerador de pó

Para a calibração do prato giratório foi necessário utilizar sacos descartáveis de aspirador de pó, um cronômetro da marca *CRONOBIO SW 2018* e como material particulado, a rocha fosfática. No primeiro instante, fez-se uma marcação no prato giratório adotando como um ponto de origem e, em seguida, ajustou-se o controlador de velocidade de rotação do prato desejada dada em percentagem da velocidade de rotação máxima. Utilizando um cronômetro determinava-se o tempo gasto para o alimentador de pó dar uma volta completa. Esse procedimento foi realizado para vários percentuais da rotação máxima.

Após essa operação, preencheu-se sulco semicircular do prato giratório com o material particulado e na saída da mangueira do tubo de Venturi utilizou-se um saco descartável de aspirador de pó virgem anteriormente pesado para a coleta do material particulado sugado até completar uma volta do alimentador de pó para determinada velocidade de rotação (%). Em seguida, pesou-se o saco de aspirador de pó com o material particulado e fez a diferença entre a massa de saco descartável virgem com a massa coletada.

Assim, com os dados de massa e tempo para cada velocidade de rotação (%) foi possível determinar a vazão mássica (g/s):

$$Q = \frac{M_2 - M_1}{t} \quad (3.2)$$

em que,  $Q$  é a vazão mássica de pó,  $M_2$  é a massa de pó coletada equivalente a uma rotação do prato de alimentação,  $M_1$  é o peso do saco descartável de aspirador de pó e  $t$  é o tempo de rotação do prato giratório.

### 3.6 - Calibração da placa de orifício

Para calibração da placa de orifício foi utilizado um anemômetro de fio quente, da marca *TSI Incorporated* modelo 8346 *VelociCalc*® acoplado na tubulação de gás entre o soprador e a placa de orifício, durante o procedimento de calibração. Uma vista esquemática pode ser vista na Figura 3.9.

A calibração da placa de orifício iniciou-se com a menor vazão de ar de sucção, ou seja, com a válvula  $V_4$  totalmente aberta, sendo feitas marcações de queda de pressão através

de um manômetro em U conectado à placa de orifício com a correspondente velocidade do ar e temperatura fornecidos pelo anemômetro de fio quente.

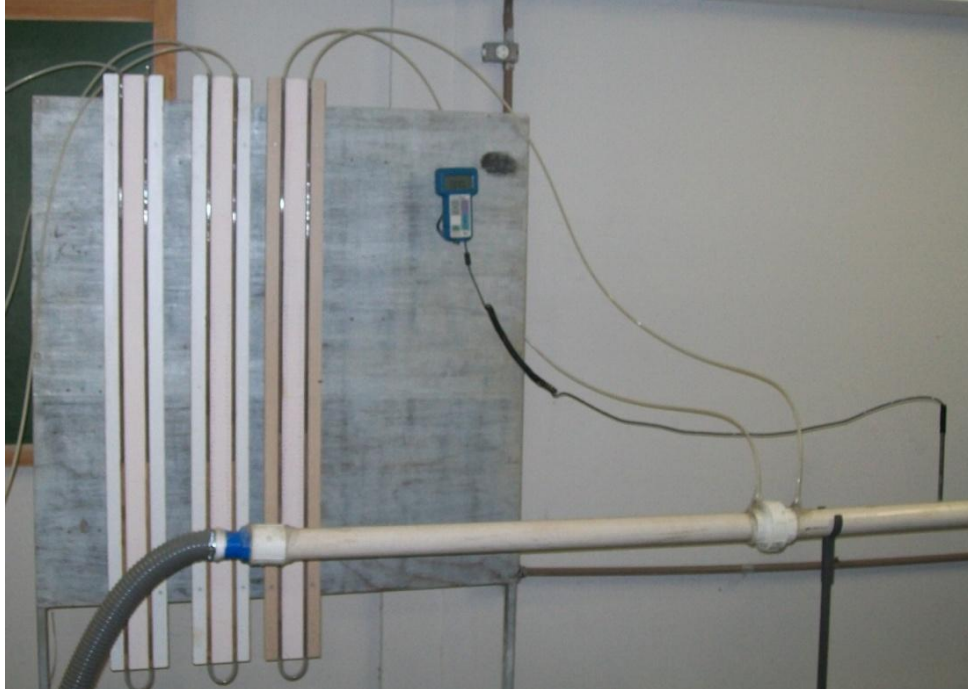


Figura 3.9: Calibração da placa de orifício.

A calibração da placa de orifício iniciou-se com a menor vazão de ar de sucção, ou seja, com a válvula  $V_4$  totalmente aberta, sendo feitas marcações de queda de pressão através de um manômetro em U conectado à placa de orifício com a correspondente velocidade do ar e temperatura fornecidos pelo anemômetro de fio quente.

Esse procedimento foi executado durante toda a calibração da placa de orifício até atingir a capacidade máxima da unidade experimental em relação à placa de orifício calibrada. Foram calibradas as placas de orifício de diâmetros de 8 e 10 mm. Com a placa de 8 mm eram possíveis medidas de velocidades superficiais de filtração de até 12 cm/s e com a placa de 10mm de diâmetro de orifício eram possíveis medidas da velocidade de limpeza requerida de 15 cm/s, que foi a velocidade utilizada para limpeza das tortas de filtração.

O procedimento para a calibração das placas bem como as equações utilizadas para cálculo são apresentados no APÊNDICE A.

Assim, com os dados experimentais obteve-se uma equação através de regressão linear com  $r^2$  de 0,99 para a placa de 8 mm de diâmetro utilizando *software STATISTICA*® 7.0.

$$V_f = 0,04057 + 1,60135E-5 \cdot x \quad (3.3)$$

Para a placa de orifício de 10 mm de diâmetro a equação encontrada com  $r^2$  0,99 foi:

$$V_f = 0,06122 + 3,02888E-5 \cdot X \quad (3.4)$$

em que, Y é a velocidade de filtração do gás em m/s e X é a queda de pressão medida no manômetro, dada em Pascal.

### 3.7 – Metodologia experimental

A tabela 3.4 representa a descrição sumária das condições experimentais adotadas na execução dos experimentos de filtração de gases.

Tabela 3.4: Esquema de execução dos experimentos

Tecido	Pó	Velocidade de Filtração (cm/s)	Velocidade de Limpeza (cm/s)	$\Delta P_{máx}$ (cmH <sub>2</sub> O)	Mecanismo de Limpeza	Umidade Relativa do Ar (%)
Acrílico	Rocha Fosfática	5, 7,5 e 10	15	10, 20, 30 e 40	Fluxo de Ar Reverso	8 a 12 %
Poliéster						
Polipropileno						

### 3.8 - Filtração de gases

Os ensaios de filtração aconteciam da seguinte forma: o material particulado passava-se pelo processo de quarteamento manual e era levado para a estufa por um período de secagem de 24 horas a 105°C.

Após esse período, o material particulado era retirado da estufa e colocado em um dessecador até que esfriasse completamente (dia anterior aos experimentos, por volta de 10 horas). Em seguida, era feito o controle da umidade relativa do ar no interior da caixa de acrílico de forma que os ensaios de filtração iniciassem com umidade relativa de 10% e permanecesse entre 8% a 12%.

A umidade relativa do ar no interior da caixa era atingida utilizando ar comprimido controlado manualmente através de um filtro processador de ar e regulador de pressão que era conectado aos dois desumidificadores com o intuito de garantir a entrada de ar praticamente seco no interior da caixa de acrílico, completamente vedada.

A extremidade superior da caixa de filtração era mantida desconectada à caixa de filtração de forma que o ar no interior da caixa de acrílico pudesse sair. Utilizavam-se também potes de sílicas gel dentro da caixa de acrílico para aumentar o controle da umidade relativa do ar, cujo controle, era realizado com o auxílio do psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido presente no interior da caixa e a diferença de temperaturas dos termômetros bulbo seco e bulbo úmido era determinado à umidade relativa do ar através de uma carta psicrométrica.

Ao atingir umidade relativa do ar no interior da caixa desejada, o material particulado era retirado do dessecador e transportado para o gerador de pó, no qual se acionava o motor vibratório e o pó era colocado no cone de alimentação agitado pelo motor até que preenchesse todo o sulco semicircular do prato. Este previamente calibrado para garantir a mesma alimentação de pó em todos os ensaios realizados a uma velocidade de rotação controlada através de um variador de velocidade em 30% de sua capacidade.

Durante esse procedimento, o meio filtrante de seção circular, com diâmetro de 20 cm, era pesado em uma balança analítica da SHIMADZU modelo AY220 e fixado na caixa de filtração através de parafusos, a placa de orifício era 8 mm de diâmetro e as válvulas gavetas eram ajustadas de acordo com os parâmetros experimentais determinados.

Após todos os ajustes necessários, fechava-se parcialmente o filtro processador de ar e controlador de pressão que mandava ar para a caixa de acrílico para o controle da umidade interna, de forma que colocasse a extremidade superior cônica da caixa de filtração sobre a caixa de filtração e o soprador era acionado imediatamente. Logo, abria-se a saída de ar do filtro processador de ar conectado ao desumidificador de acesso ao tubo de Venturi para sucção do pó no prato giratório e, ao mesmo tempo, controlava-se a velocidade de filtração desejada através da combinação de válvulas com a respectiva placa de orifício de forma a mantê-la constante durante toda a filtração.

Após controlar a velocidade de filtração de interesse utilizando uma placa de orifício previamente calibrada acoplada a um manômetro tubo em U, o prato giratório era acionado e sua alimentação de pó era mantida constante. O pó sugado pelo tubo de Venturi era disperso na linha que o levava até a caixa de filtração através da sucção do soprador. A operação de filtração era interrompida após atingir as quedas de pressão máximas pré-estabelecidas através

da interrupção da sucção do Venturi e desligamento do soprador e do prato giratório, simultaneamente.

Durante todo o período de filtração, a caixa de filtração permanecia na posição vertical e as medidas das quedas de pressão no meio filtrante eram tomadas em 30 em 30 segundos até atingir o valor desejado.

Os parâmetros utilizados foram velocidades de filtração de 5, 7,5 e 10 cm/s, para quatro quedas de pressão no meio filtrante 10, 20, 30 e 40 cmH<sub>2</sub>O e três diferentes tipos de tecidos sendo, o polipropileno, o poliéster e o acrílico.

### **3.8.1 - Limpeza**

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

A operação de limpeza do meio filtrante era realizada após atingir a queda de pressão estabelecida. Assim, a extremidade superior da caixa de filtração era retirada e a caixa de filtração era colocada na posição horizontal cuidadosamente para que não danificasse a torta de filtração.

Em seguida, o interior da caixa de filtração era limpo com um pincel para a remoção do excesso de pó nas paredes da caixa e uma folha de papel anteriormente pesada era colocada dentro da caixa de filtração para a coleta da massa de pó desprendida. As válvulas eram ajustadas de forma que permitisse a inversão do fluxo de ar e a placa de orifício de 8 mm de diâmetro era alterada para a placa de orifício de 10 mm de diâmetro.

A válvula que permitia a inversão do fluxo de ar era aberta lentamente até atingir a velocidade de limpeza requerida medida através das tomadas de quedas de pressão no manômetro em U acopladas a placa de orifício.

A velocidade de limpeza utilizada foi de 15 cm/s e mantida constante durante 60 segundos, sendo que, de acordo com TIENI (2005), após esse tempo de limpeza constatou que não há mais desprendimento da torta da filtração. A velocidade de limpeza escolhida foi de 15 cm/s. De acordo com o trabalho de TOGNETTI (2007), que verificou a influência da velocidade de limpeza (5, 10 e 15 cm/s) nos filtros de tecido a base de polipropileno, poliéster e acrílico e constatou que a velocidade de limpeza de 15 cm/s mostrou ser mais eficiente.

A válvula era aberta lentamente para evitar um brusco desprendimento da torta de filtração devido ao pulso de ar. Após o período de 60 segundos de limpeza o soprador era

desligado e a massa desprendida no papel era pesada e o filtro com a massa retida também. Sendo que, a diferença das massas do papel virgem com o papel com massa desprendia resultava na massa removida do tecido, e a diferença da massa do tecido virgem com o tecido com massa retida no tecido era a massa retida, no qual a somatório da massa removida com a massa retida tinha-se a massa da torta de filtração formada e, conseqüente, a fração de massa retida e removida.

### 3.9 – Obtenção da porosidade das tortas de filtração

A porosidade das tortas de filtração foi determinada pelo método indireto através das correlações de Ergun (1952), Ergun modificada, MacDonald para partículas rugosas e a equação de Kozeny- Carman que são apresentadas a seguir:

Equação de Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1-\varepsilon)\mu_g V_f Q}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} + 1,75 \frac{Q \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p} \quad (2.23)$$

Equação de Ergun modificada desprezando o termo viscoso:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1-\varepsilon)\mu_g V_f Q}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} \quad (2.27)$$

Equação Kozeny-Carman:

$$\frac{\Delta P}{t} = 180 \frac{(1-\varepsilon)\mu_g V_f Q}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} \quad (3.5)$$

Equação MacDonald para partículas rugosas:

$$\frac{\Delta P}{t} = 180 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_g V_f Q}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} + 4 \frac{Q \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p} \quad (3.6)$$

sendo  $\Delta P$  a queda de pressão total no filtro,  $t$  o tempo de filtração,  $\mu_g$  a viscosidade do gás,  $V_f$  a velocidade de filtração,  $Q$  a vazão mássica de sólidos,  $A$  a área de filtração,  $\rho_p$  a densidade da partícula,  $\rho_g$  a densidade do gás,  $d_p$  o diâmetro da partícula e  $\varepsilon$  a porosidade da torta de filtração.

Através dessas correlações foi possível determinar a porosidade parcial e final das tortas de filtração em função da carga mássica de sólidos (W).

As correlações utilizadas nesse trabalho foram desenvolvidas, de forma geral, para leito fixo, partículas esféricas na faixa de tamanho de  $10^2$  e  $10^4$ , para porosidade do leito entre 0,1 e 0,75, meios porosos homogêneos e incompressíveis e para números de Reynolds da partícula maior que a unidade.

### 3.9.1 – Obtenção massa de pó depositada por unidade de área

A massa de pó depositada no filtro por unidade de área foi determinada através da Equação (3.7) a cada 30 segundos durante o período de filtração para cada queda de pressão pré-estabelecida no meio filtrante.

$$W_i = \frac{M_i t_i}{A t_t} \quad (3.7)$$

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

### 3.9.2 – Obtenção da resistência específica dos meios filtrantes

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

Nos ensaios considerou-se que a espessura dos meios filtrantes permaneceram constantes durante a filtração e que o fluido era newtoniano e incompressível. Assim, a

resistência específica do meio filtrante pôde ser determinada calculando a inclinação da parte linear da curva de pressão em função da velocidade de filtração, conforme a equação (3.8):

$$\Delta P_m = k_m V_f \quad (3.8)$$

em que,  $\Delta P_m$  é a queda de pressão no meio filtrante,  $V_f$  a velocidade do gás e  $k_m$  a resistência específica do meio filtrante.

### 3.9.3 – Obtenção da resistência específica dos meios filtrantes

A resistência específica da torta de filtração foi determinada através da Equação 3.9 que relaciona a queda de pressão no sistema de filtração de gases em função da massa de pó depositada por unidade de área e velocidade superficial de filtração, conforme pode ser observado:

$$\Delta P_T = k_c V_f W \quad (3.9)$$

em que,  $\Delta P_T$  é a queda de pressão no sistema de filtração,  $V_f$  a velocidade do gás e  $k_c$  a resistência específica da torta de filtração e  $W$  é a massa de pó depositada por unidade de área.

### 3.9.4 - Obtenção da permeabilidade dos meios filtrantes

A viscosidade do gás foi calculada por meio da equação dada por SUTHERLAND (DEMÉE, 1983).

$$\mu_g(T) = 1,73 \times 10^{-5} \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5} \left( \frac{398}{T + 125} \right) \quad (3.10)$$

na qual,  $\mu_g$  é a viscosidade do gás, dada em ( $\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) e  $T$  temperatura do gás, dada em Kelvin.

O procedimento utilizado para a obtenção da permeabilidade dos meios filtrantes consistia na passagem de um fluxo gasoso através do meio filtrante virgem fixado à caixa de



filtração, em que eram realizados apontamentos de queda de pressão no meio filtrante em função da variação da velocidade de filtração.

A permeabilidade foi estimada através da equação proposta por Darcy em 1856, em que é aplicada para velocidades de filtração menores que 10 cm/s (SILVA, 2008). Assim, a equação (3.11) se resulta em:

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{k_1} V_f \quad (3.11)$$

Sendo  $\Delta P_m$  a queda de pressão no meio filtrante,  $L_m$  a espessura do meio filtrante,  $k_1$  permeabilidade do meio filtrante,  $V_f$  velocidade de filtração e  $\mu_g$  viscosidade do gás.

---

## CAPÍTULO 4

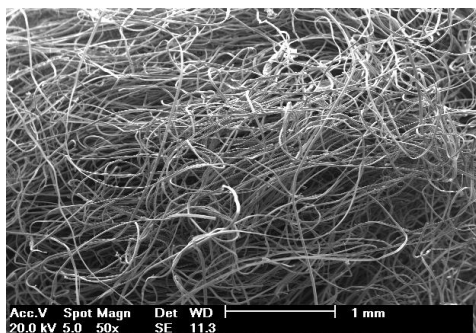
### RESULTADOS E DICUSSÕES

---

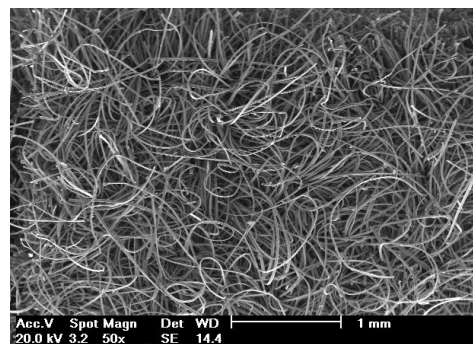
Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos e efetuadas discussões dos procedimentos experimentais adotadas para a caracterização da operação de filtração e remoção das tortas de filtração.

#### 4.1 – Caracterização dos meios filtrantes

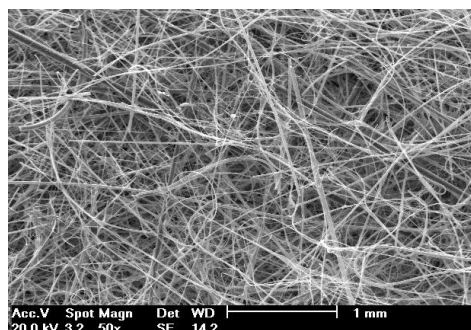
A caracterização dos meios filtrantes iniciou com as microfotografias no microscópio eletrônico de varredura (MEV) do Centro de Microscopia Eletrônica da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS, Cachoeirinha, RS). A Figura 4.1 apresenta microfotografias da superfície dos tecidos de polipropileno, poliéster e acrílico.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1: Microscopia eletrônica de varredura dos tecidos testados. Aumento de 50X. (a) Polipropileno, (b) Poliéster e (c) Acrílico, PUCRS..

Na figura 4.1 percebe-se que há um arranjo desordenado das fibras dos meios filtrantes caracterizando em feltros. Todos esses meios filtrantes sofreram tratamentos de calandragem e chamuscagem.

Os ensaios para determinar a resistência específica dos meios filtrantes ao escoamento do gás foram realizados utilizando o sistema experimental conforme Figura 3.1, em que, determinou-se a resistência específica calculando-se a inclinação da parte linear da curva da queda de pressão no filtro em função da velocidade superficial de filtração mostrado na Figura 4.2 utilizando a equação 2.17. O valor da resistência específica de cada tecido e o quadrado do coeficiente de correlação correspondente se encontra na Tabela 4.1.

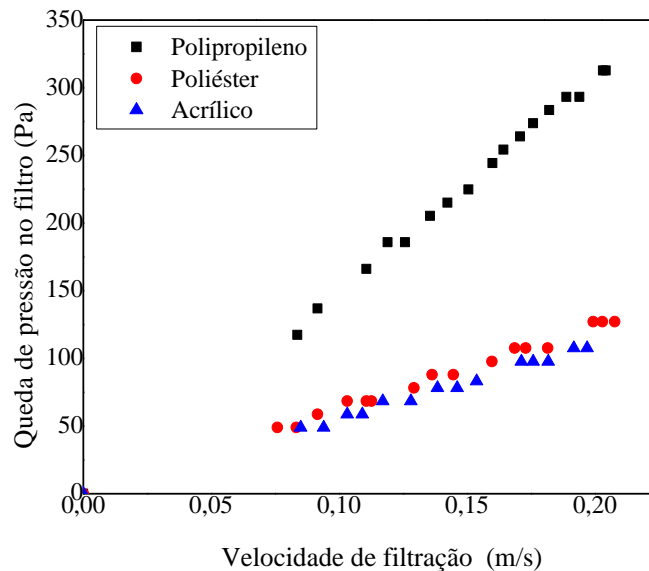


Figura 4.2: Resistência específica dos meios filtrantes

Tabela 4.1: Valor obtido para a resistência específica dos meios filtrantes ( $k_1$ ) e para o coeficiente de correlação ( $R^2$ ).

Tecido	Resistência específica do tecido ( $k_m$ ) [ $\text{Kg m}^2 \text{s}^{-1}$ ]	Quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ )
Polipropileno	1564,93	0,99
Poliéster	617,51	0,99
Acrílico	550,76	0,99

Portanto, por análise da Tabela 4.1 pode-se dizer que, o tecido que apresentou maior resistência ao escoamento do fluido foi o polipropileno, seguido do poliéster e acrílico. Isso

permite concluir que, a estrutura superficial do polipropileno é mais fechada que os demais, ou seja, há menor presença de espaços vazios (poros) devido a maior inclinação da curva de queda pressão em função da velocidade superficial de filtração.

A permeabilidade para cada meio filtrante ( $k_1$ ) foi determinada através da equação de Darcy, equação 2.21. A equação de Forchheimer, equação 2.22 não foi utilizada devido ao fato da curva experimental da queda de pressão em função à velocidade superficial de filtração ser representada por uma reta, indicando a preponderância das forças viscosas com relação às inerciais. Os valores da permeabilidade são apresentados na Tabela 4.2 e no APÊNICE B:

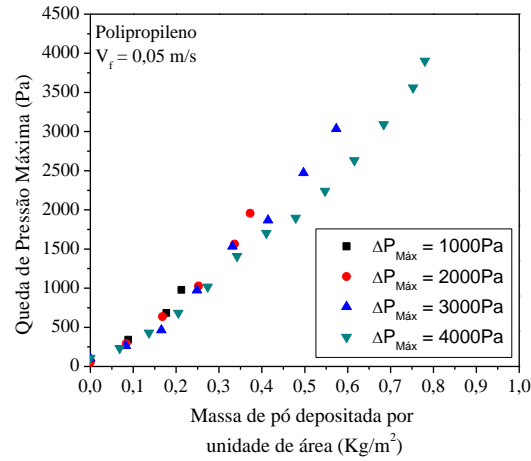
Tabela 4.2: Valores obtidos para a permeabilidade darciana ( $k_1$ ).

Tecido	Permeabilidade ao ar ( $k_1$ ) [m <sup>2</sup> ]
Polipropileno	$2,6 \times 10^{-11}$
Poliéster	$6,03 \times 10^{-11}$
Acrílico	$7,48 \times 10^{-11}$

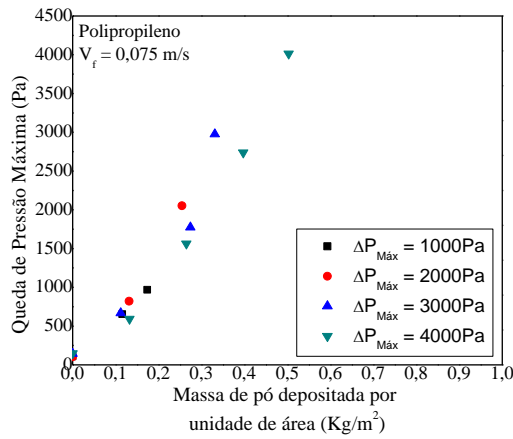
Com isso, o tecido que apresentou maior permeabilidade de acordo com a Tabela 4.2 foi o meio filtrante à base de acrílico, seguido do poliéster e polipropileno, e que as permeabilidades dos tecidos estão praticamente constantes com o aumento da queda de pressão no meio filtrante. Isto mostra que também não houve alteração significativa nas propriedades do fluido causadas pelo acréscimo da queda de pressão, como a viscosidade e a densidade do gás.

#### 4.2 – Desempenho dos meios filtrantes

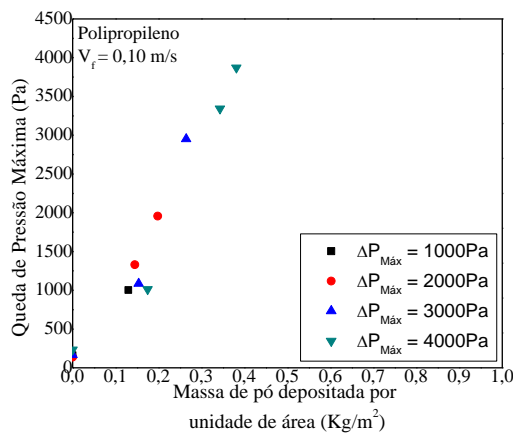
Para verificar as diferenças do desempenho dos meios filtrantes na operação de filtração e remoção das tortas de filtração, foram construídas curvas de quedas de pressão em função da massa de pó depositada por unidade de área para as velocidades de filtração de 0,05, 0, 075 e 0,10 m/s. As Figuras 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, os resultados para os casos de utilização dos meios filtrante à base de polipropileno, poliéster e acrílico.



(a)

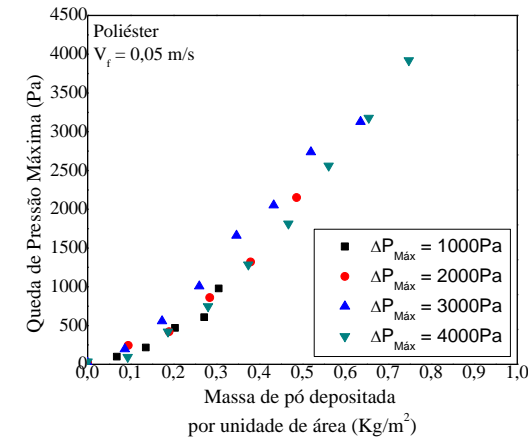


(b)

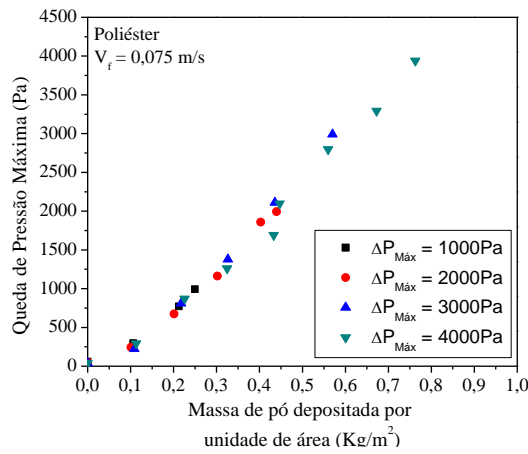


(c)

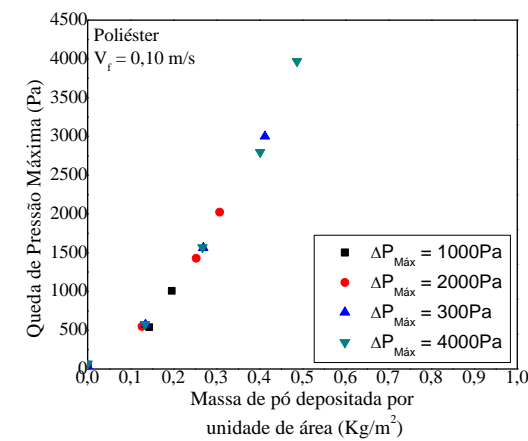
Figura 4.3: Queda de pressão em função da massa depositada por unidade de área para o meio filtrante polipropileno, velocidade de filtração de (a) 0,050, (b) 0,075 e (c) 0,10 m/s.



(a)

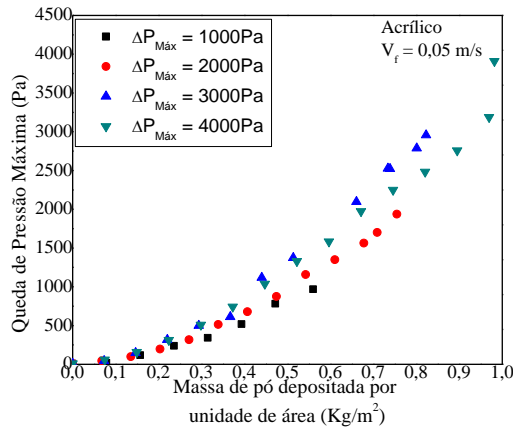


(b)

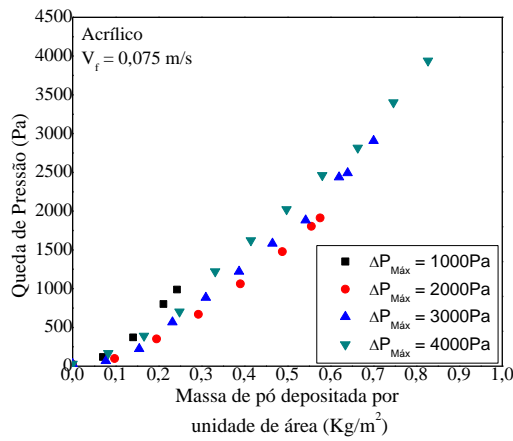


(c)

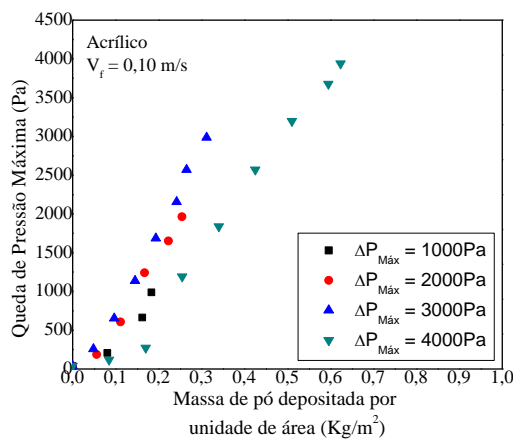
Figura 4.4: Queda de pressão em função da massa depositada por unidade de área para o meio filtrante poliéster, velocidade de filtração de (a) 0,05, (b) 0,075 e (c) 0,10 m/s.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5: Queda de pressão em função da massa depositada por unidade de área para o meio filtrante acrílico, velocidade de filtração de (a) 0,05, (b) 0,075 e (c) 0,10 m/s.

Por análise das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, percebe-se que o desempenho das filtrações utilizando os diferentes tecidos na filtração de gases foi distinto um do outro e que os ensaios experimentais, com a variação da espessura das tortas de filtração (quedas de pressão máximas estabelecidas no filtro) apresentaram boa reprodutibilidade, o que pode ser notado através da sobreposição das curvas de filtração. A partir dessas figuras, pode-se constatar também que o meio filtrante que apresentou maior massa de pó depositada por unidade de área, conseqüentemente, maior tempo de filtração para uma mesma queda de pressão máxima foi o acrílico, seguido do poliéster e do polipropileno.

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

A não-linearidade apresentada no início da filtração com o meio filtrante acrílico indica a predominância da filtração interna, demonstrando que este meio filtrante coletou maior quantidade de material particulado no seu interior em relação aos demais, resultando em um período de formação da torta de filtração mais lento, conforme pode ser observado pela Figura 2.10, em que essa etapa indica a fase em que as partículas depositam-se no interior das fibras do tecido (etapa de transição inferior ou filtração de profundidade) formando a base da estrutura da torta a ser formada (dendritos) e, posteriormente, a formação de uma camada fina na superfície do tecido (ponto de colmatação) em que as partículas são coletadas e apresentando uma curva linear (filtração superficial ou ponto de transição superior).

Tal fato foi ocasionado por razão deste meio filtrante apresentar uma maior permeabilidade, conforme mostrado nas Figuras 4.2 e 4.3 e que filtros mais permeáveis possuem um incremento de queda de pressão menos elevado e, conseqüentemente, maior ponto de colmatação.

Segundo TOGNETTI (2007) um ponto de colmatação maior torna mais apropriado para a operação de filtração devido proporcionar menores quedas de pressão a princípio.

Em relação ao meio filtrante polipropileno, como já mencionado, o comportamento não-linear praticamente não existiu, caracterizando em uma filtração superficial, na qual se observa uma maior inclinação das curvas de filtração para uma mesma queda de pressão máxima estabelecida, devido ao fato deste meio filtrante apresentar uma menor permeabilidade em relação aos demais meios filtrantes, representando um período de operação de filtração com formação das tortas de filtração mais curto, havendo,



conseqüentemente, menor quantidade de material coletado para as mesmas condições, menor penetração das partículas e, conseqüentemente, menor ponto de colmatação, pois, conforme KIMURA et al. (1985) apud OSORIO (2006), a rápida colmatação é mais provável com filtros de materiais de alta densidade de empacotamento uma, vez que há menor espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas.

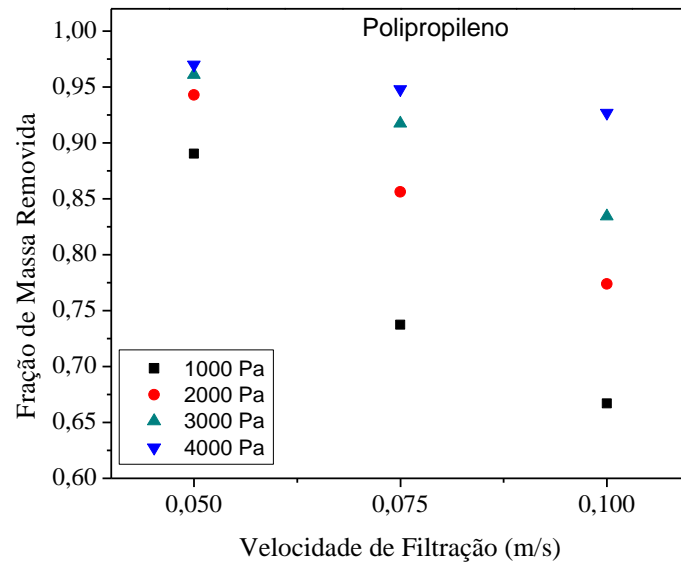
TANABE (2008) verificou que o meio filtrante a base de polipropileno apresentou uma baixa profundidade de deposição de partículas em relação aos tecidos poliéster e acrílico, sendo que, o tecido acrílico foi o que apresentou maior profundidade média de deposição das partículas e o poliéster tratado uma profundidade intermediária. A deposição de partículas no interior do polipropileno ocorre mais próximo da superfície do meio filtrante resultando na obstrução dos poros mais rapidamente e gerando tortas mais finas que os demais tecidos. Isto devido a maior intensidade no tratamento superficial do tecido poliéster apresentar uma estrutura superficial mais fechada que o acrílico, interferindo na penetração das partículas no interior do tecido.

### **4.3 Massa Removida e Massa Retida**

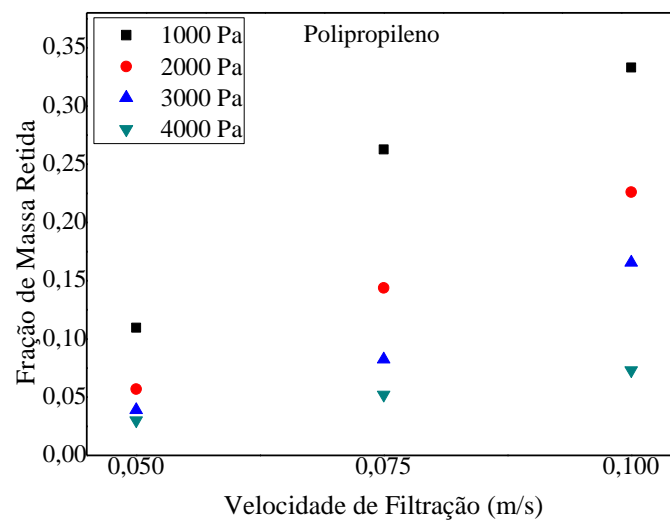
As Figuras 4.6 a 4.8 mostram a fração de massa retida e a fração de massa removida na operação de limpeza, utilizando velocidades superficiais de filtração de 0,05, 0,075 e 0,10 m/s, e velocidade de limpeza de 0,15 m/s, para o polipropileno, poliéster e acrílico.

Pode-se observar que há um decréscimo da fração removida e o crescimento da fração de massa retida com a utilização de maiores velocidades de filtração.

Para os três meios filtrantes, pode-se dizer que, para maiores velocidades superficiais de filtração obteve-se uma maior massa retida e uma menor massa removida. Isso pode ser explicado devido o aumento da velocidade superficial de filtração proporcionar maior empacotamento da torta, diminuindo a distância entre as partículas e aumentando a tensão de remoção do aglomerado, o que dificulta a remoção das tortas (CAMPOS et al.,2009).

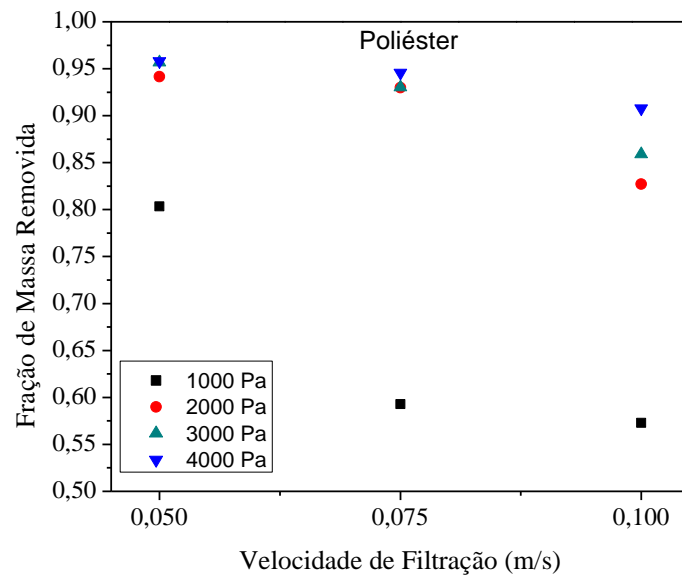


(a)

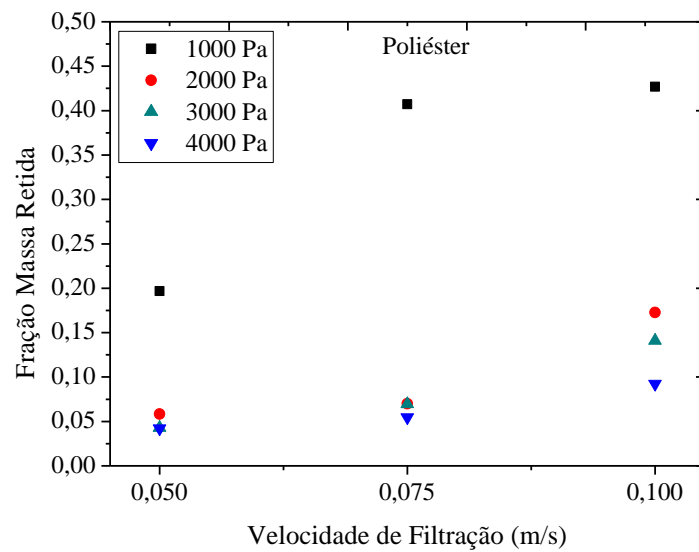


(b)

Figura 4.6: (a) Fração de massa removida (a) e fração de massa retida (b), respectivamente, meio filtrante polipropileno, para velocidades de filtração de 0,05, 0, 075 e 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s.

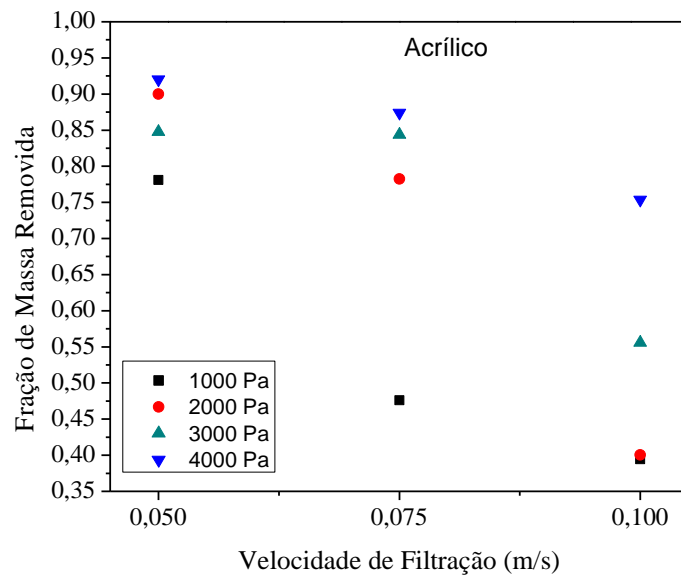


(a)

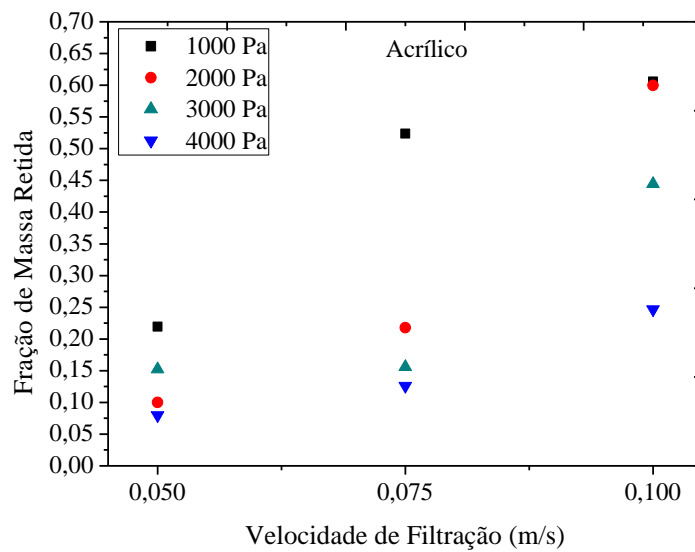


(b)

Figura 4.7: Fração de massa removida (a) e fração de massa retida (b), respectivamente, meio filtrante poliéster, para velocidades de filtração de 0,05, 0, 075 e 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s



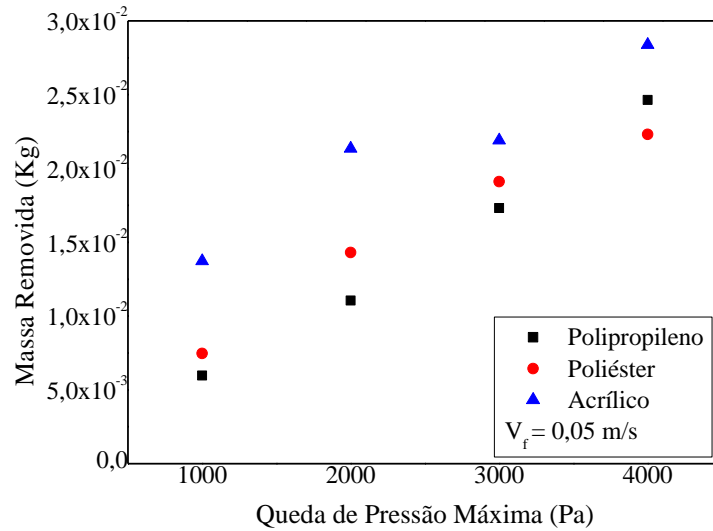
(a)



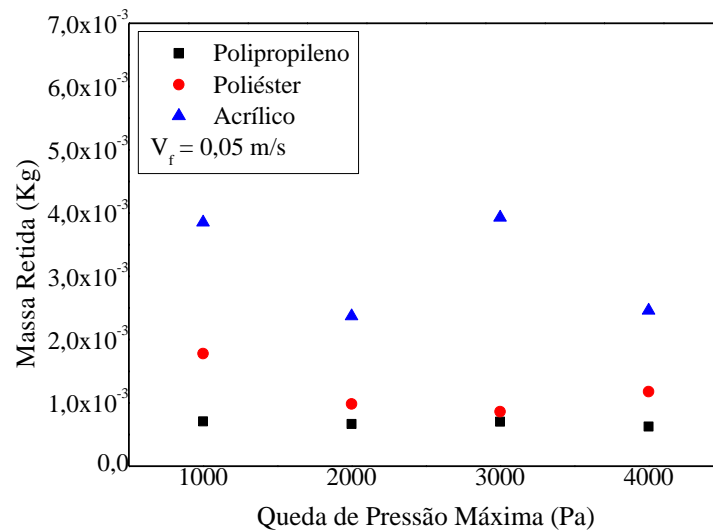
(b)

Figura 4.8: Fração de massa removida (a) e fração de massa retida (b), respectivamente, meio filtrante acrílico, para velocidades de filtração de 0,05, 0, 075 e 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam os gráficos que relacionam as massas retidas e removidas em função da queda de pressão no filtro, para os três meios filtrantes.

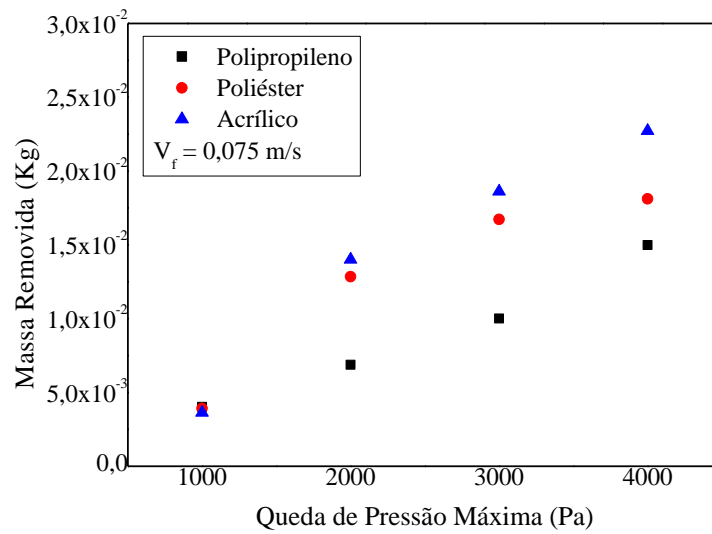


(a)

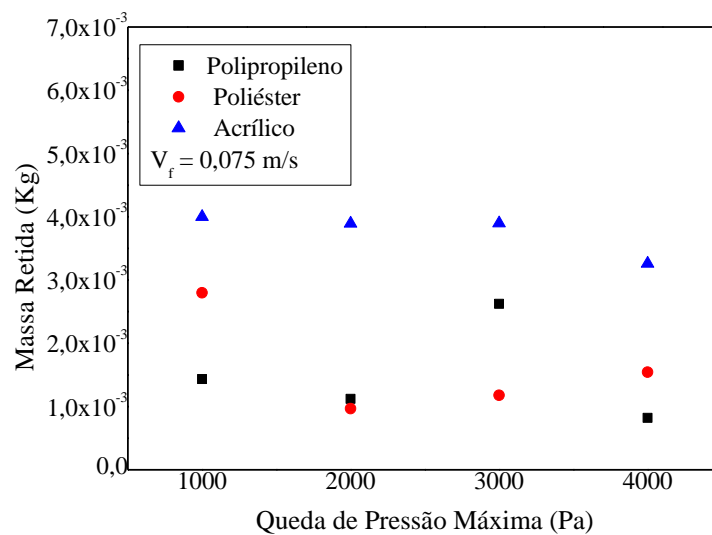


(b)

Figura 4.9: Massa removida (a) e massa retida (b) em função da queda de pressão no filtro, respectivamente, para os meios filtrantes de polipropileno, poliéster e acrílico, e velocidades de filtração de 0,05 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s.

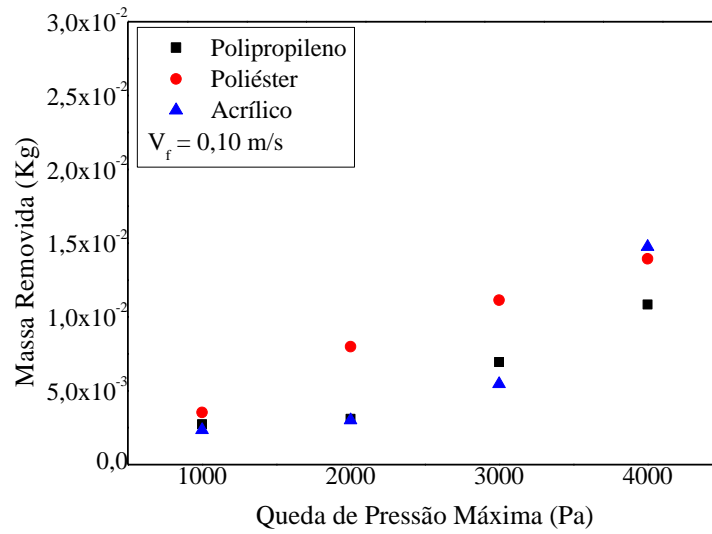


(a)

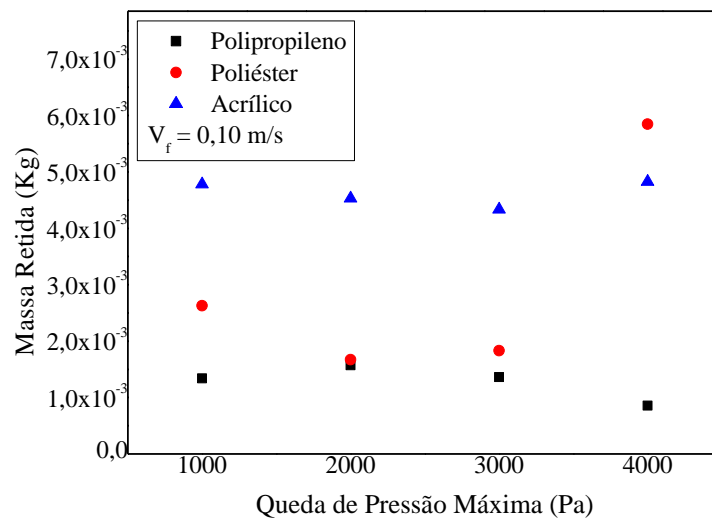


(b)

Figura 4.10: Massa removida (a) e massa retida (b) em função da queda de pressão no filtro, respectivamente, para os meios filtrantes de polipropileno, poliéster e acrílico, para velocidades de filtração de 0,075 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s



(a)



(b)

Figura 4.11: Massa removida (a) e massa retida (b) em função da queda de pressão no filtro, respectivamente, para os meios filtrantes de polipropileno, poliéster e acrílico, para velocidades de filtração de 0,10 m/s e velocidade de limpeza de 0,15 m/s

Comparando os resultados obtidos para os três meios filtrantes, comprova-se que acrílico apresentou maior massa retida e maior massa removida para as três velocidades de filtração em relação aos demais tecidos decorrente da característica própria de cada tecido, tal como maior permeabilidade e menor densidade de empacotamento das fibras, conforme

apresentado anteriormente, na qual possibilitou maior impregnação de partículas em relação aos demais para as três velocidades de filtração, sendo maior para as velocidades de filtração.

Para maiores velocidades de filtração tem-se maior filtração interna e para menores velocidades maior filtração superficial, pois a força de arraste exercida nas partículas para maiores velocidades de filtração é maior e possibilita uma maior força de adesão das partículas no interior dos tecidos.

#### 4.4 – Determinação da porosidade das tortas através do método indireto.

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

As Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 mostram o comportamento da porosidade para as Equações de Ergun (1952) e MacDonald em função das espessuras de tortas de filtração e velocidades de filtração para o polipropileno, poliéster e acrílico, sendo que, as Equação de Ergun Modificada apresentou valores semelhantes à Equação de Ergun (1952), sendo desprezível o termo quadrático da Equação de Ergun (1952) e da Equação de MacDonald, pois foram utilizadas velocidades superficiais de filtração de 5, 7,5 e 10 cm/s, que de acordo com SILVA (2008) o termo viscoso é significativo para velocidades de filtração  $\leq 10 \text{ cm/s}$ . Pode-se observar esse comportamento no APÊNDICE D.

As Equações de MacDonald e Kozeny-Carman apresentaram valores ligeiramente superiores aos valores das de Ergun, uma vez que, essas equações foram geradas da própria Equação de Ergun, tendo como diferença apenas o valor da constante, que para Ergun (1952) vale 150 e 1,75, para MacDonald vale 180 e 4 que considera a rugosidade das partículas e permite maior faixa de abrangência da equação.



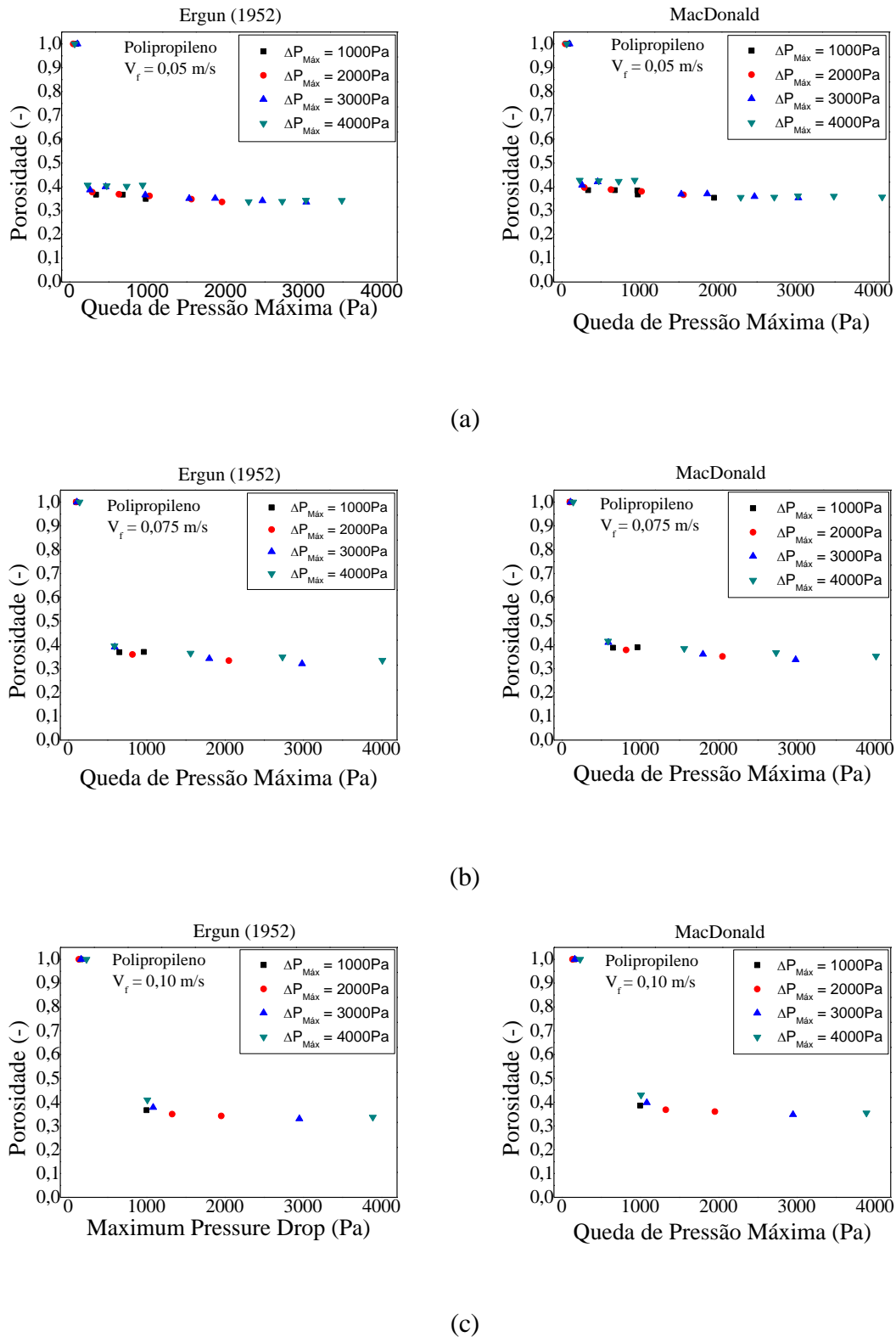


Figura 4.12: Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações da literatura, para meio filtrante de polipropileno em experimentos realizados variando as velocidades superficiais de filtração de 0,05 m/s (a), 0,075 m/s (b) e 0,10 m/s (c) e a queda de pressão máxima.

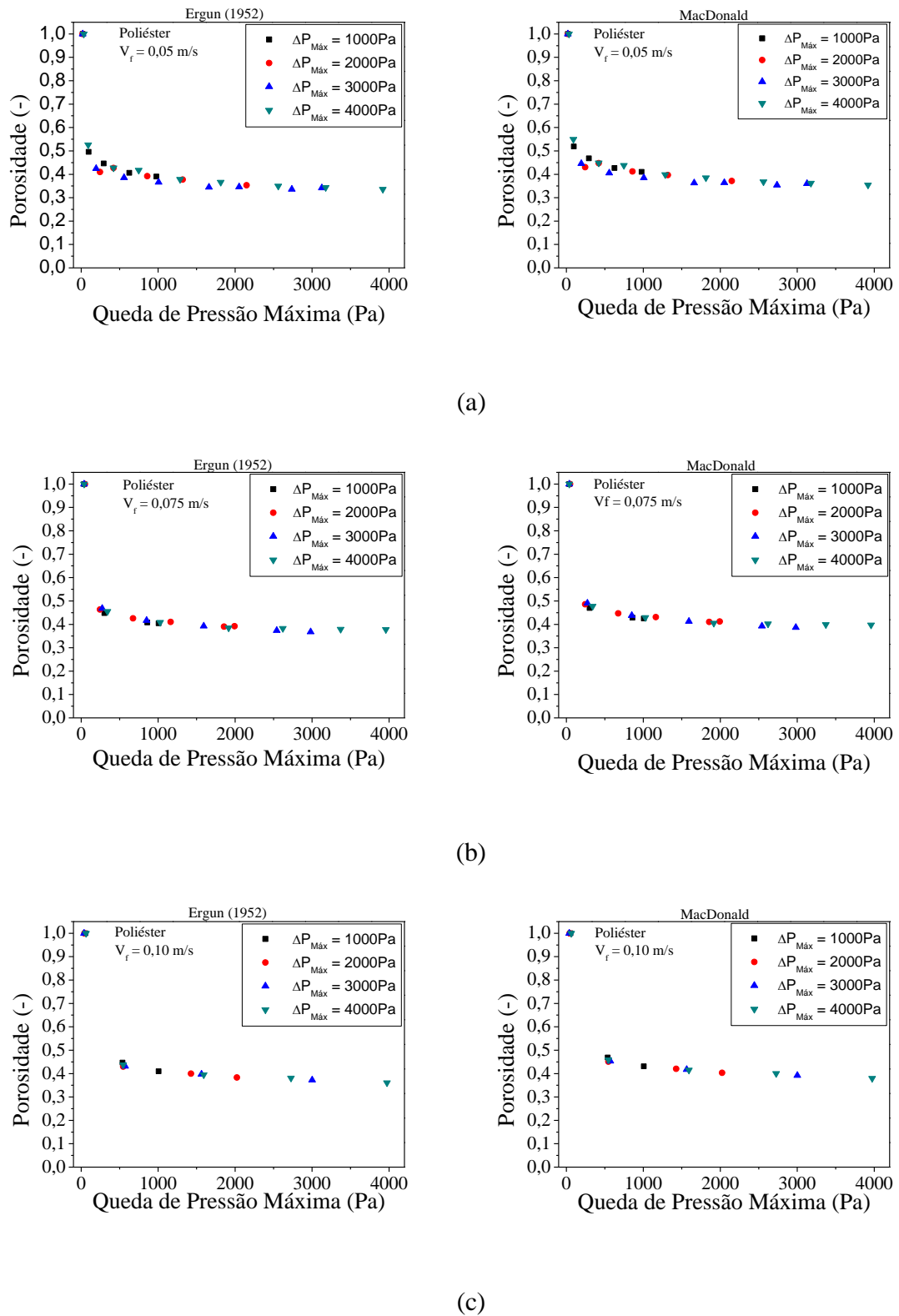


Figura 4.13: Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações da literatura, para meio filtrante de poliéster em experimentos realizados variando as velocidades superficiais de filtração de 0,05 m/s (a), 0,075 m/s (b) e 0,10 m/s (c) e a queda de pressão máxima.

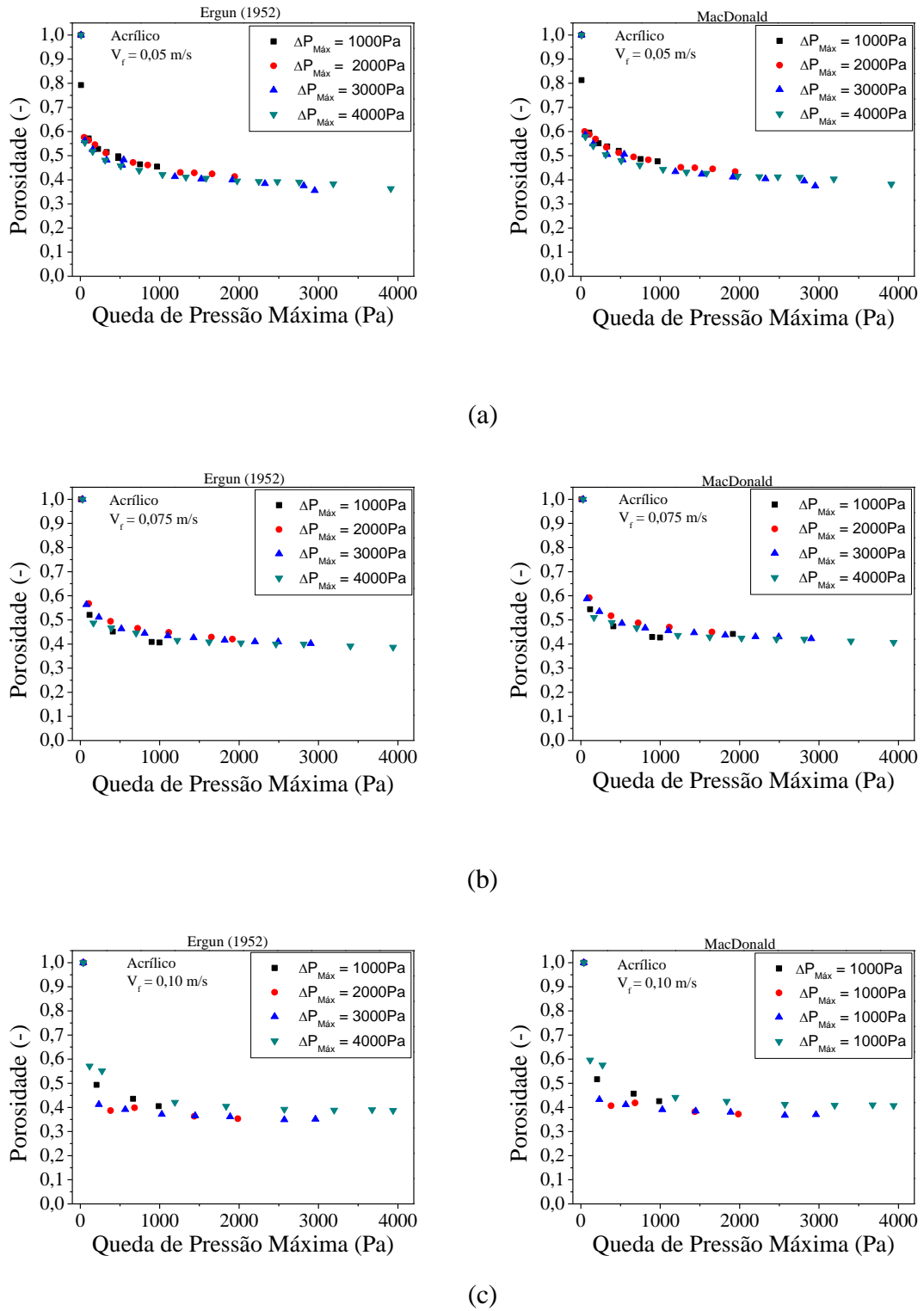


Figura 4.14: Porosidade de tortas de filtração obtidas por correlações da literatura, para meio filtrante acrílico em experimentos realizados variando as velocidades superficiais de filtração de 0,05 m/s (a), 0,075 m/s (b) e 0,10m/s (c) e a queda de pressão máxima.

Por observação das Figuras 4.12, 4.13 e 4.14 pode-se perceber que, para os diferentes meios filtrantes nas mesmas condicionais operacionais, a porosidade de tortas de filtração diminuiu com o aumento da espessura de tortas de filtração.

O decréscimo da porosidade em função da espessura de torta pode ser explicado devido ao fato do aumento da queda de pressão proporcionar maior compactação das tortas de filtração, diminuindo a distancia entre as partículas e obstruindo a passagem do fluxo gasoso.

CHOI et al. (2004) justificaram que, à medida que aumentam a massa de pó depositada por unidade de área, as camadas mais próximas ao tecido são comprimidas pela força de arraste provocada pela queda de pressão através das camadas superiores e que a porosidade e espessura das camadas previamente formadas são reduzidas com o aumento da carga mássica. Entretanto, a taxa de aumento da camada de pó torna-se constante após uma determinada carga mássica, pois a torta de filtração sob uma certa espessura torna-se incompressível e o efeito da compressibilidade ocorre quando há o desvio da curva conforme pode ser observado pela Figura 4.15.

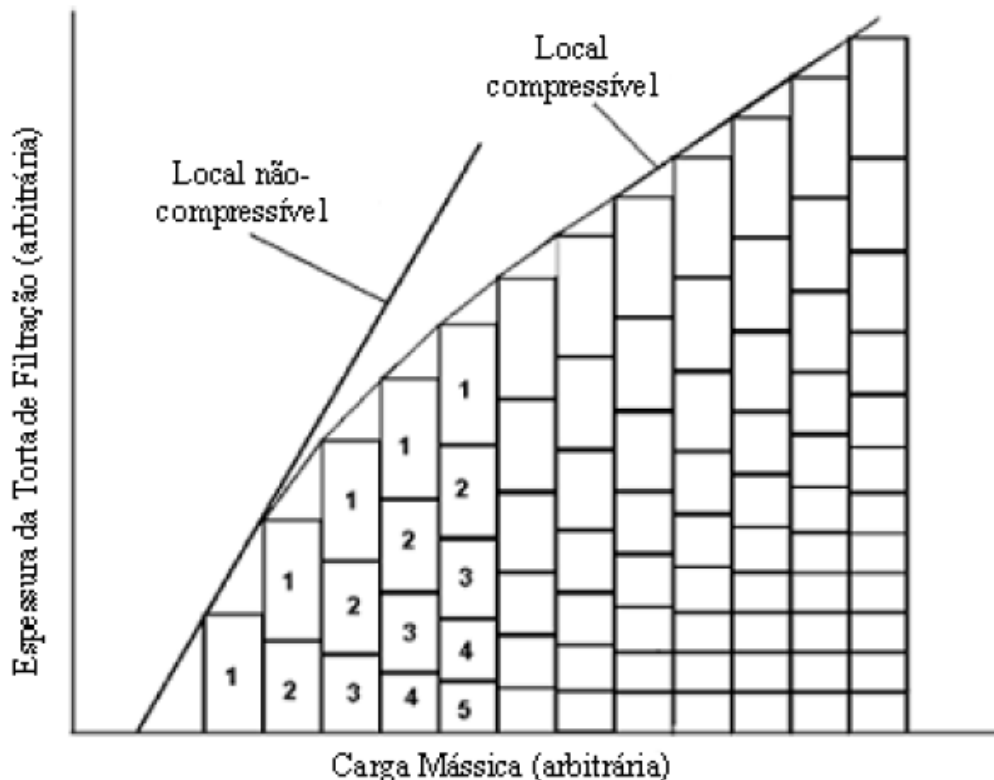


Figura 4.15: Comportamento das camadas de pó com o aumento da carga mássica (CHOI et al., 2004b).

Percebe-se que a porosidade diminuiu, até atingir cada queda de pressão máxima estabelecida, a uma velocidade de filtração constante e variando com o tempo de filtração, como era de se esperar de acordo com as equações.

A porosidade de tortas de filtração diminuiu para os três tecidos e velocidades de filtração até atingir a queda de pressão máxima de 3000 Pa e depois retornou a crescer até para queda de pressão máxima de 4000 Pa. Esse comportamento também foi observado pela NEGRINI et al. (2001) que verificou que a porosidade média estimada pela Equação de Ergun modificada, diminuía e depois aumentava para as velocidades superficiais de filtração de 6,8 cm/s e 8,9 cm/s.

MATUGI et al (2009) também observaram esse comportamento utilizando a equação de Ergun (1952) a uma velocidade superficial de filtração constante de 10 cm/s, material particulado como rocha fosfática e o meio filtrante o feltro de poliéster, em que a porosidade médias das tortas de filtração decresceu inicialmente com a massa de pó depositada por unidade de área (variando de 0,54 a 0,46) e depois aumentou para 0,50.

FARGNOLI (2010) estudou a compressibilidade de tortas de filtração de gases com os filtros de tecido a base de poliéster e acrílico e como material particulado a rocha fosfática e talco e utilizando as equações de Ergun (1952) e MacDonald para a determinação da porosidade de tortas de filtração e o método direto para cinco quedas de pressão máxima (300, 600, 900 e 1200 mmH<sub>2</sub>O) e observou que a porosidade média dada pelas equações da literatura e a fornecida pelo método direto (porosidade média em cada posição e a porosidade média total de cada torta) diminuiu e depois aumentou e que a possível explicação para esse comportamento seria a quantidade de pó depositada na superfície do tecido, uma vez que a porosidade tende a ser maior à medida que se aproxima da interface torta, uma torta mais espessa apresentaria uma região mais porosa maior se destacando sobre o efeito da compressibilidade causado pela carga mássica depositada sobre as camadas inferiores da torta.

AZEVEDO (2009) utilizando como material particulado o amido de milho e os modelos de Ergun, MacDonald e Endo et al. (1998) observou que a porosidade da torta formada apresentou maiores valores, variando entre 0,56 e 0,65 e pode ser explicado devido à deposição das partículas uma sobre as outras com o decorrer da filtração, possibilitar o surgimento de espaços vazios ou lacunas que reduzem a resistência específica da torta e aumentam a porosidade de tortas de filtração.

Os valores das porosidades encontradas para as equações literárias para cada queda de pressão máxima no sistema de filtração e a porosidade média das tortas de filtração encontram-se 4.3 a 4.5

Tabela 4.3- Valores das porosidades das tortas de filtração de gases obtidas para as correlações literárias para velocidades de filtração diferentes e meio filtrante polipropileno.

Meio filtrante	Queda de Pressão Máxima (Pa)	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
Polipropileno $V_f = 0,05$ m/s	978	0,35	0,37	0,35	0,37
	1955	0,34	0,35	0,34	0,35
	3035	0,34	0,35	0,34	0,35
	3904	0,34	0,36	0,34	0,36
Porosidade Média		<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>
Polipropileno $V_f = 0,075$ m/s	968	0,37	0,39	0,37	0,39
	2053	0,33	0,35	0,33	0,35
	2977	0,32	0,34	0,32	0,34
	4013	0,33	0,35	0,33	0,35
Porosidade Média		<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>
Polipropileno $V_f = 0,10$ m/s	1002	0,37	0,39	0,37	0,39
	1955	0,34	0,36	0,34	0,36
	2952	0,33	0,35	0,33	0,35
	3871	0,34	0,35	0,34	0,35
Porosidade Média		<b>0,34</b>	<b>0,36</b>	<b>0,34</b>	<b>0,36</b>

Percebe-se que para o polipropileno para as velocidades 0,05 m/s e 0,075 m/s a porosidade média permaneceu constante e aumentou para a velocidade de 0,10 m/s e que os tecidos de poliéster e acrílico a porosidade aumentou da velocidade de 0,05 m/s para 0,075 m/s e diminuiu para a velocidade de 10 cm/s.

SILVA et al. (2001) observou para uma vazão mássica de 0,1482 g/s e altas velocidades de filtração de 11,15 e 15,5 cm/s, a porosidade obtida pela equação de Ergun aumentou com o aumento da velocidade de filtração e atribuíram esse comportamento ao efeito da interação entre as variáveis velocidade de filtração e taxa de alimentação de pó. Já para a diminuição da porosidade de tortas de filtração da velocidade superficial de filtração de 0,075 m/s para 0,10 m/s justifica-se pelo fato de que maiores velocidades de filtração proporcionam maior arraste das partículas penetrando mais intensamente nas fibras dos

tecidos preenchendo os espaços vazios gerando uma estrutura mais compactada e, conseqüentemente, obstrução da passagem do fluxo gasoso.

Tabela 4.4- Valores das porosidades das tortas de filtração de gases obtidas para as correlações literárias para velocidades de filtração diferentes e meio filtrante poliéster.

Meio filtrante	Queda de Pressão Máxima (Pa)	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
Poliéster $V_f = 0,05 \text{ m/s}$	978	0,39	0,41	0,39	0,41
	2151	0,35	0,37	0,35	0,37
	3128	0,34	0,36	0,34	0,36
	3920	0,34	0,35	0,34	0,35
Porosidade Média		<b>0,36</b>	<b>0,37</b>	<b>0,36</b>	<b>0,37</b>
Poliéster $V_f = 0,05 \text{ m/s}$	978	0,40	0,43	0,40	0,42
	2151	0,39	0,41	0,39	0,41
	3128	0,37	0,39	0,37	0,39
	3920	0,38	0,40	0,38	0,40
Porosidade Média		<b>0,39</b>	<b>0,41</b>	<b>0,39</b>	<b>0,41</b>
Poliéster $V_f = 0,05 \text{ m/s}$	1007	0,41	0,43	0,41	0,43
	2024	0,38	0,40	0,38	0,40
	3001	0,37	0,39	0,37	0,39
	3974	0,36	0,38	0,36	0,38
Porosidade Média		<b>0,38</b>	<b>0,40</b>	<b>0,38</b>	<b>0,40</b>

Tabela 4.5- Valores das porosidades das tortas de filtração de gases obtidas para as correlações literárias para velocidades de filtração diferentes e meio filtrante acrílico.

Meio filtrante	Queda de Pressão Máxima (Pa)	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
Acrílico $V_f = 0,05$ m/s	968	0,46	0,48	0,46	0,48
	1936	0,41	0,43	0,41	0,43
	2957	0,37	0,38	0,37	0,38
	3910	0,36	0,38	0,36	0,38
Porosidade Média		<b>0,40</b>	<b>0,42</b>	<b>0,40</b>	<b>0,42</b>
Acrílico $V_f = 0,05$ m/s	987	0,40	0,42	0,40	0,42
	1950	0,42	0,44	0,42	0,44
	2908	0,40	0,42	0,40	0,42
	3939	0,39	0,41	0,39	0,40
Porosidade Média		<b>0,40</b>	<b>0,42</b>	<b>0,40</b>	<b>0,42</b>
Acrílico $V_f = 0,05$ m/s	997	0,41	0,43	0,41	0,43
	1975	0,36	0,38	0,36	0,38
	2986	0,34	0,36	0,34	0,36
	3939	0,39	0,41	0,39	0,41
Porosidade Média		<b>0,38</b>	<b>0,39</b>	<b>0,37</b>	<b>0,39</b>

#### 4.5 – Resistência Específica da Torta de Filtração

A resistência específica da torta de filtração foi determinada através do cálculo da inclinação da parte linear da curva de arraste  $\left( \frac{\Delta P_c}{V_f} \right)$  em relação a massa de pó depositada por unidade de área., conforme a equação 3.9.

Assim, pode-se determinar a equação da curva da queda de pressão máxima no sistema de filtração de acordo com a equação 4.1, em que relaciona a resistência específica do meio filtrante e a resistência específica da torta.

$$\frac{\Delta P}{V_f} = k_m + k_c W \quad (4.1)$$

Considerando que



$y = \frac{\Delta P}{V_f}$  ,a força de arraste;

$a = k_m$  ,a resistência específica do meio filtrante;

$b = k_c$  ,a resistência específica da torta de filtração;

$W = x$  , massa de pó depositada por unidade de área.

temos,

$$y = a + bx \quad (4.2)$$

As Tabelas de 4.6 a 4.8 encontram-se os parâmetros da curva.

Tabela 4.6: Valores da resistência específica das tortas de filtração para diferentes velocidades de filtração e meio filtrante polipropileno.

Velocidade de filtração (m/s)			0,05	0,075	0,10
Tecido	$k_m$ (Kgm <sup>-2</sup> t <sup>-2</sup> )	$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	$k_c$ (t <sup>-1</sup> )		
Polipropileno	1564,93	1000	80233	65687	64827
		2000	100030	101850	89745
		3000	105006	92993	102594
		4000	107954	103018	99216

Tabela 4.7: Valores da resistência específica das tortas de filtração para diferentes velocidades de filtração e meio filtrante poliéster.

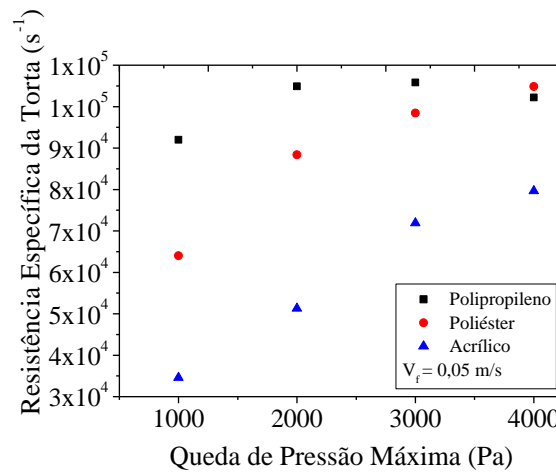
Velocidade de filtração (m/s)			0,05	0,075	0,10
Tecido	$k_m$ (Kgm <sup>-2</sup> t <sup>-2</sup> )	$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	$k_c$ (t <sup>-1</sup> )		
Poliéster	617,51	1000	61818	52978	45482
		2000	85124	62261	63350
		3000	105849	75528	72182
		4000	107491	74300	78447

Tabela 4.8: Valores da resistência específica das tortas de filtração para diferentes velocidades de filtração e meio filtrante acrílico.

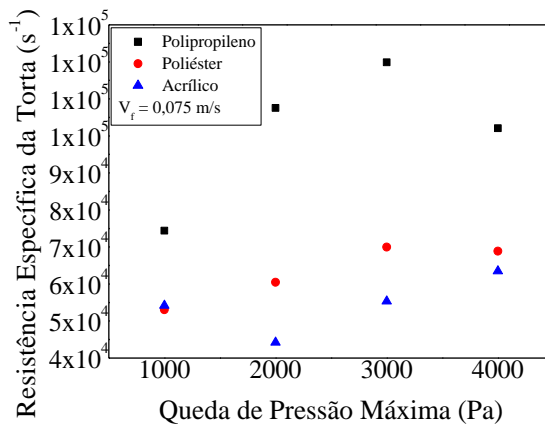
Velocidade de filtração (m/s)			0,05	0,075	0,10
Tecido	$k_m$ (Kgm <sup>-2</sup> t <sup>-2</sup> )	$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	$k_c$ (t <sup>-1</sup> )		
Acrílico	550,76	1000	35342	55280	49201
		2000	50336	47412	79788
		3000	75345	56841	92773
		4000	73740	64480	68585

O tecido polipropileno foi o que apresentou uma torta de filtração menos porosa por causa de sua estrutura superficial ser mais compactada e ser menos permeável ao ar que os demais, fazendo com que as partículas do material particulado preenchessem os espaços vazios (livres) mais rapidamente, obstruindo a passagem do fluido e atingindo a queda de pressão máxima estabelecida em menos tempo de operação e, conseqüentemente, menor carga mássica, gerando tortas menos porosas e mais resistentes.

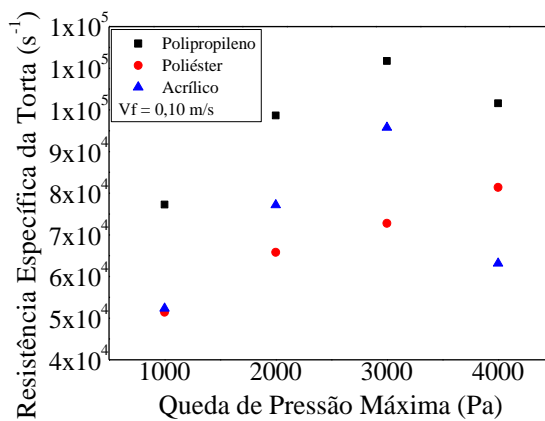
Já o poliéster e acrílico, como dito anteriormente, apresentam estruturas superficiais menos compactadas e maior permeabilidade ao ar, resultando, para uma mesma queda de pressão máxima no meio filtrante, uma carga mássica maior, devido às partículas se alojarem melhor nos espaços vazios, alta captura de partículas no interior dos tecidos, gerando tortas de filtração mais porosas, conforme Figuras 4.4 a 4.6 e uma tendência de serem menos resistentes como mostra a Figura 4.16 e as Tabelas 4.6 a 4.8.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.16: Resistência específica das tortas de filtração para diferentes meios filtrantes e velocidades superficiais de filtração de 0,05m/s (a), 0, 075m/s (b) e 0,10m/s (c).

---

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

---

O Capítulo 5 apresenta as conclusões obtidas nesse trabalho e sugestões futuras para continuidade de novas pesquisas.

Com base nos resultados apresentados, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- foi observado um aumento linear na queda de pressão em função da velocidade superficial de filtração para os três meios filtrantes, polipropileno, poliéster e acrílico, indicando preponderância das forças viscosas sobre as inerciais. Tal constatação permitiu calcular a permeabilidade dos meios filtrantes através da Equação de Darcy;
- o polipropileno apresentou maior resistência ao escoamento do fluido que o poliéster e acrílico;
- o meio filtrante que apresentou estrutura superficial mais aberta e apresenta menor resistência ao escoamento do fluido foi o acrílico, seguido do poliéster e polipropileno;
- o tecido à base de polipropileno apresentou menores tempos de filtração e massas depositadas para as três velocidades de filtração utilizadas neste trabalho. Isso se deve à sua menor permeabilidade ao ar.
- o meio filtrante acrílico apresentou maior período de filtração interna, resultando em maior massa de pó depositada por unidade de área e maior período de filtração até atingir a queda de pressão máxima estabelecida, apresentando curvas de filtração com um comportamento não linear no início da filtração, atingindo um comportamento linear posteriormente, filtração superficial.
- ao aumentar a velocidade superficial de filtração, nas mesmas condições operacionais de queda de pressão máxima estabelecida, o sistema de filtração contendo meio filtrante de polipropileno apresentou maior inclinação das curvas de filtração, atingindo a pressão máxima em menor tempo de filtração e recolhendo menor quantidade de sólidos. Os sistemas de filtração compostos por meios filtrantes de poliéster e o acrílico apresentaram tempos de filtração crescentes;

- o sistema de filtração constituído pelo meio filtrante acrílico apresentou maior massa retida e maior massa removida para as três velocidades de filtração em relação ao poliéster e polipropileno;
- a porosidade das tortas de filtração diminuiu com o aumento da massa de pó depositada por unidade de área ou aumento da queda de pressão estabelecida e depois aumentou, demonstrando que a quantidade de massa depositada por unidade de área influencia na porosidade.
- a porosidade das tortas de filtração para o polipropileno apresentou um aumento para a velocidade de 0,10 m/s e para os tecidos acrílico e poliéster apresentaram um aumento nas velocidades de 0,05 m/s para 0,075 m/s e tendendo a diminuir para a velocidades de 10 cm/s;
- as permeabilidades ao ar dos tecidos e superfície estrutural dos tecidos interferiram na quantidade de massa removida e massa retida e, conseqüentemente, na formação de tortas de filtração, resultando, para tecidos mais permeáveis e maior abertura superficial, tortas mais porosas e uma tendência menor na resistência específica da torta para diferentes velocidades de filtração e espessura de tortas de filtração;
- as porosidades das tortas de filtração calculadas indiretamente pelas equações de Kozeny-Carman e de MacDonald foram idênticas (desprezível o termo quadrático) e apresentaram valores superiores aos encontrados pela utilização das equações de Ergun e de Ergun modificada;
- as porosidades das tortas de filtração constituídas por pó de rocha fosfática sobre meio filtrante de polipropileno variaram entre 0,33 a 0,37, quando calculadas a partir das equações de Ergun (1952) e de Ergun Modificada e entre 0,35 a 0,39, quando calculadas pelas equações de MacDonald e Kozeny-Carman. Para as tortas formadas sobre meio filtrante de poliéster, o uso das equações de Ergun (1952) e Ergun Modificada produziram porosidades variando entre 0,34 a 0,41 e o uso das equações de MacDonald e Kozeny-Carman levou a porosidades entre 0,35 a 0,43. Para as tortas formadas sobre meio filtrante acrílico, as equações de Ergun (1952) e de Ergun Modificada as porosidades variaram de 0,36 a 0,46 e entre 0,36 a 0,48 quando calculadas usando as equações de MacDonald e de Kozeny-Carman.

Para a continuidade do trabalho desenvolvido propõe-se as seguintes etapas futuras para o aprofundamento em filtração de gases em filtros de tecidos utilizando fluxo de ar reverso como mecanismo de limpeza:

- Determinar a porosidade das tortas de filtração através do método direto desenvolvido por Aguiar (1995);
- Trabalhar com materiais particulados diferentes e faixas granulométricas diferentes;
- Trabalhar com ciclos de filtração e limpeza e avaliar a força de adesão por unidade de área para o mesmo material particulado e outros diferentes;
- Estudar o comportamento de remoção da torta de filtração por blocos.
- Avaliar a fluidodinâmica do gás através das técnicas de CFD
- Estudar a remoção das tortas de filtração através do mecanismo de limpeza por vibração mecânica sem interrupção da operação de filtração.

---

## CAPÍTULO 7

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

AGUIAR, M. L. Filtração de ar em filtros de tecido. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1991.

AGUIAR, M. L. Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

AZEVEDO, S. G. R. Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

BARNETT, T. Improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment. *Filtration and Separation*, p. 28-32, 2000.

BROWN, C. A.; SCHNELLE Jr, K. B. Air pollution control technology handbook. Boca Raton, CRC Press, 1 ed., 2002, p. 386.

BARROS, P. M. de. Estudo da força de adesão de tortas de filtração de gases em diferentes condições operacionais. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

BERGMAN, W. A. H.; HEBARD, H. D.; LUM, B. Y.; KUHL, W. D. Electrostatic air filters generated by electric fields. Lawrence Livermore National Laboratory. Fine Particle Society Fall Meeting, September 18 – 19, 1980, University of Maryland, College Park, Maryland, January 27, 1980. Disponível em [www.4shared.com](http://www.4shared.com). Acesso em: novembro, 2010.

CAMPOS, M. M.; AGUIAR, M. L. “Filtração de gases: estudo da força de adesão entre tortas de concentrado fosfático e tecidos de fibras sintéticas”. In. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Uberlândia, MG, 2009.

CAPES, C. E.; DARCOVICH, K.; JONASSON, K. A. Developments in the control of fine particulate air emissions. *Advanced Powder Technol.* Vol. 8 nº 3, p. 179 – 215, 1997.

CLARK, G. Design considerations of needlefelts used for air filtration applications. *The Journal of the Filtration Society*, v.01, 2001.

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

CHEN, Y.; HSIAU, S. Influence of filtration superficial velocity on cake compression and cake formation. *Chemical Engineering and Process: Process Intensification*. p. 988 – 996, 2009b.

CHENG, Y.; TSAI, C. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. *Aerosol Science and Technology*, 29:4, 315 – 328, 1998. Disponível em: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Acesso em: setembro, 2010.

CHERMISINOFF, N. P. *Handbook of air pollution prevention and control*, cap.7, p. 404 – 417, 2002.

CHERMISINOFF, N. P. & YOUNG, R. A. *Air pollution control and design handbook*, part I. New York, Marcel Dekker Inc. 1977, p. 607.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. *Air pollution control: a design approach*, cap. 3, p. 115 – 117, cap. 6, p. 177 – 203, 3 ed., 2002.

CHOI, J. H; HA, J. S.; JANG, H.J. Compression properties of dust cake of fine fly ashes a from a fluidized combined cycle fly ashes on a ceramic filter. *Powder Techonology*, v. 140, p. 106 – 115, 2004.

COURY, J. R. *Electrostatic effects in granular bed filtration of gases*. Tese de Doutorado, Cambridge Univ., Inglaterra, 1983.

DAVIS, W. T. *Air pollution engineering manual*, cap.3, p. 99 – 116, 2 ed., 2000.



DAVIS, W.T.; KIM, G.D. Effect of prefilters on the performance of HEPA filters. *Filtration and Separations*, p.51-56, 1999.

DICKENSON, C. *Filters and filtration Handbook*. [S.I.]: 3, 1994.

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

DULLIEN, F.A.L. *Introduction to industrial gas cleaning*. Academic Press, San Diego, 1989.

FARGNOLI, A. G. Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

FREITAS, N. L.; MANIERO, M. G., COURY, J. R. Filtração de aerossóis em altas temperaturas utilizando filtros cerâmicos de dupla camada: influência do diâmetro de partículas na eficiência de coleta. *Cerâmica*, v. 50, n. 316, p. 355 – 361, 2004

HARDMAN, E. Filter media selection, science or black art? *The journal of the filtration society*, v. 01, 2001.

HINDS, W. C. *Aeresol Tecnology*. John Wiley & Sons, New York, 1982.

HUNG, Y.; PEREIRA, N. C., WANG, L. K. Air pollution control engineering, cap.2, p. 59 – 95, vol. 1, 2004.

INNOCENTINI, M.D.; PARDO, A.; V.C. PANDOLFELLI. How accurate is darcy's law. *The American Ceramic Society Bulletin*, p. 64 – 68, 1999.

INNOCENTINI, M. D. et al. Permeability optimization and performance evaluation of hot aerosol filters made using for an incorporated alumina suspension. *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, p. 212 – 221, 2009.

ITO, L. X. Estudo da porosidade de torta de filtração de gases. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

ITO, L. X.; AGUIAR, M. L. A study of the porosity of gás filtration cakes. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 26, nº2, p. 307 – 315, 2009.

JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T.; LIU, B. Y. H. Effective pore diameter and monodisperse particle clogging fibrous filters. Journal Aerosol Science, vol. 28, n 1, p. 147 – 158, 1996.

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

KANAOKA, C.; MAO, N.; OTANI, Y.; YAO, Y. Modeling the filtration process with a flat-type fabric filter. Original paper. Advanced Powder Technol., vol. 17, nº 3, p. 237 – 256, 2006. Disponível em: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Acesso em: setembro, 2010.

KRAMMER, G.; SALEEM, M. Effect of filtration velocity and dust concentration on cake formation and filter operation in a pilot scale jet pulsed bag filter. Journal of Hazardous Materials 144, p. 677 – 681, 2007.

LICHT, W. Air pollution control engineering: basic calculations for particulate collection, cap. 8, p. 373 – 409, 2ed. 1988.

LIU, B. Y. H.; RUBOW, K. L. Proc. Of the 5<sup>th</sup> world filtration congress, França, 1990.

LUCAS, R. D. de. Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de torta de filtração de gases em filtros de tecidos. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

MARTINS, J. C. Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido. 2001. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

MATTESON, M. J. Filtration: Principles and practites. New York, Marcel Dekker Inc., 1987.

MATUGI, K.; MATINATTI, I.; FARGNOLI, A. G; AGUIAR, M. L. Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos. VII CONGRESSO BRASILEIRO DE

ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA – COBEQ, Uberlândia, MG, 2009.

MAUSCHITZ, G.; KOSCHUTNIG, W.; HOFLINGER, W. Analysis of the clogging behavior of thermally finished nonwoven dust filter media by optically detected porosity parameters. *Anais FILTECH*, V.II, p.II-20 a II-28, 2005.

MELLO, R. L. S. de. Estudo do mecanismo eletroforético de coleta na filtração de aerossóis. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

MYCOCK, J. C.; MICKENNA, J. D.; THEODORE, L. Handbook of air pollution control engineering and technology, 1995.

NEGRINI, V.S.; MARTINS, J.C.; COURY, J.R. E; AGUIAR, M.L. Determinacao da porosidade de tortas de filtracao de gases em funcao da velocidade superficial de filtracao. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, Sao Joao Del-Rei, MG, 2000, *Anais do XXVIII ENEMP*, Teresopolis, RJ, 2001, p. 191-197.

NI, L. A.; YU, A. B.; LU, G. Q.; HOWES, T. Simulation of the cake formation and growth in cake filtration. *Minerals Engineering* 19, p. 1084 – 1097, 2006.

OSÓRIO, V. M. Comportamento da filtração de gases em meios filtrantes de celulose. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006

PAYET, S.; BOULAUD, D.; MADELAINE, G.; RENOUX, A. Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. *Journal Aerosol Science*, v. 23, n. 7, p. 723 – 735, 1992.

ROCHA, S. M. S. Limpeza de gases em filtros manga: estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

RODRIGUES, K. B. Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

ROTHWELL, E. Changing patterns in dust filtration research. *Filtration and Separation*, p.36-41, 1989.

SEVILLE, J. P. K.; DUO, W.; KIRKBY, N. F.; BUNCHELE, H.; CHEUNG, C. K. Patchy cleaning of rigid gas filters. *Chemical Engineering Science*, v. 52, nº 1, p. 153 – 164, 1997.

SILVA, G. M. C. Desempenho de filtros cerâmicos na filtração de gases a altas temperaturas. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química\_ Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

SILVA NETO, O. G. Filtração de gás em filtro de manga: estudo da porosidade. In: ENCONTRO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE MATERIAIS PARTICULADOS – XXVII ENEMP, Campos do Jordão, SP, 2002. Disponível em: [www.google.com.br](http://www.google.com.br). Acesso em: setembro de 2010.

SILVA NETO, C. R.; NEGRINI, V. S.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. *Powder Technology*, p. 165 – 172, 1999.

SILVA NETO, O. G.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Filtração de gás em filtro de manga: estudo da porosidade. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*, v. 21 (1), p. 187 – 195, 2002.

SILVA, G. B., LUCAS, R. D., OLIVEIRA, W. P., AGUIAR, M. L., COURY, J. R. Effect of process parameters on cake formation and removal during gas-solid filtration in fabric filters. *World: Filtration Congress 8, Proceedings Vol. 1*, p. 245–248, apr. 2000.

SPURNEY, K. R. *Advances in aerosol filtration*. Editora Lewis Publishers, 1998.

TANABE, E. H. Estudo do comportamento da deposição das partículas em diferentes meios filtrantes. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

THEODORE, L. Air pollution control equipment calculations, cap.12, p. 503 – 513 2008.

THOMAS, D.; PENICOT, P.; CONTAL, P.; LECLERC, D.; VENDEL, J. Clogging of fibrous filters by solid aerosol particles experimental and modeling study . Chemical Engineering Science 56, p. 3549 –3561, 2001.

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

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

TSAI, C.; CHENG, Y. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. Aerosol Science and Technology, 29: 4, p. 315 – 328, 1998.

TUNG, K.; LI, Y.; LU, K.; LU, W. Effect of calendaring of filter cloth on transient characteristics of cake filtration. Separation and Purification Technology, p. 1 – 15, 2006.

WALSH, D. C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. Filtration and Separation, June 1996, p. 501 – 506. Disponível em: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Acesso em: outubro, 2010.

## **APÊNDICES**

**APÊNDICE A**  
**CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO**

## APÊNDICE A CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

A figura A1 representa uma placa de orifício utilizada para mensurar a velocidade média de um escoamento através do valor da queda de pressão provocada pelo acidente (DAMASCENO, 2005).

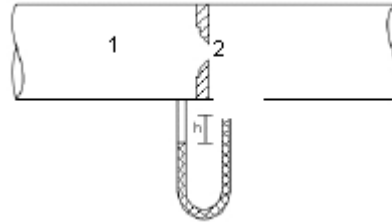


Figura A1: Desenho esquemático de um escoamento através de uma placa de orifício.

Utilizando a equação de Bernoulli nos pontos 1 e 2 da figura acima tem-se:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + h_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + h_2$$

em que:

$$\frac{v^2}{2g} = \text{Energia cinética};$$

$$\frac{P}{\gamma} = \text{Energia de pressão};$$

$h$  = Energia potencial por unidade de peso.

Considerações:

$$h_1 = h_2;$$

$\rho$  = densidade do fluido (ar);

$\rho_m$  = densidade do fluido manométrico;

$\gamma = \rho g$  = peso específico;

$g$  = aceleração da gravidade;

$D_1$  = diâmetro do tubo;



$D_2$  = diâmetro da placa de orifício;

$$\beta = \frac{D_2}{D_1} = \text{fator de redução de diâmetro.}$$

Como  $h_1 = h_2$ , então:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}.$$

Sendo  $\Delta h$  a diferença de altura de líquido no manômetro, a queda de pressão entre os pontos 1 e 2 é:

$$P_1 - P_2 = (\rho_m - \rho)g\Delta h$$

Aplicando a equação da continuidade, a velocidade no ponto 2 tem-se :

$$v_2 = v_1 \left( \frac{A_1}{A_2} \right)^2 = v_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2;$$

e

$$\beta = \frac{D_2}{D_1};$$

Substituindo essas equações na equação de Bernoulli tem-se:

$$\frac{(\rho_m - \rho)g\Delta h}{\rho g} = \frac{v_1^2}{2g} \left( \frac{1}{\beta^4} - 1 \right)$$

$$v_1^2 = \frac{2(\rho_m - \rho)g\Delta h}{\rho} \left( \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(\rho_m - \rho)g\Delta h}{\rho} \left( \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right)}$$

$$Q^{ideal} = \frac{\pi D_1^2}{4} \sqrt{\frac{2(\rho_m - \rho)gh}{\rho} \left( \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right)}$$

A vazão ideal é aquela que seria produzida caso a energia de pressão fosse convertida integralmente em energia cinética. Porém, isso só é verdade para o caso de fluidos ideais. No caso de fluidos reais uma parte desta energia é perdida devido ao atrito do fluido com o acidente. Assim, deve-se escrever:

$$v_1 = cv_1^{id}$$

em que  $v_1^{id}$  é o valor teórico obtido pela equação de Bernoulli e  $c$  o coeficiente de descarga da placa de orifício. Com isso, tem-se:

$$Q = cQ^{id}$$

$$Q = c \frac{\pi D_1^2}{4} \sqrt{\frac{2(\rho_m - \rho)g\Delta h}{\rho} \left( \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right)}$$

Rearranjando essa equação tem-se:

$$Q = c \frac{\pi D_1^2}{4} \sqrt{\frac{2(\rho_m - \rho)g\Delta h}{\rho} \left( \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right)}$$

$$Q = c(\text{Re}, \beta).Q^{ideal}$$

Tabela A1 - Calibração placa de orifício diâmetro 8 mm para filtração

$V_g$ (m / s)	$H$ (m)	$\Delta P$ (Pa)	$V_{ideal}$ (m / s)	$Q_{ideal}$ (m <sup>3</sup> / s)	$Q_{real}$ (m <sup>3</sup> / s)	$V_f$ (m / s)
0,8	0,098	958	1,05	0,0021	0,002	0,05
0,9	0,128	1251	1,20	0,0024	0,002	0,06
0,94	0,156	1525	1,33	0,0027	0,002	0,07
1,11	0,2	1955	1,50	0,0030	0,002	0,07
1,21	0,238	2327	1,64	0,0033	0,003	0,08
1,27	0,28	2737	1,78	0,0036	0,003	0,09
1,43	0,354	3460	2,00	0,0040	0,003	0,10
1,51	0,408	3988	2,14	0,0043	0,003	0,11
1,58	0,448	4379	2,25	0,0046	0,003	0,11
1,62	0,459	4487	2,27	0,0046	0,004	0,11
1,72	0,527	5152	2,44	0,0049	0,004	0,12
0,8	0,098	958	1,05	0,0021	0,002	0,05

Tabela A2 - Calibração placa de orifício diâmetro 10 mm para limpeza

$V_g$ (m / s)	$H$ (m)	$\Delta P$ (Pa)	$V_{ideal}$ (m / s)	$Q_{ideal}$ (m <sup>3</sup> / s)	$Q_{real}$ (m <sup>3</sup> / s)	$V_f$ (m / s)
1	0,05	508	1,20	0,002	0,002	0,06
1,32	0,11	1066	1,73	0,004	0,003	0,09
1,62	0,17	1681	2,18	0,004	0,004	0,12
1,8	0,23	2239	2,51	0,005	0,004	0,14
1,94	0,27	2600	2,71	0,005	0,005	0,15
2,07	0,30	2952	2,88	0,006	0,005	0,16
2,23	0,35	3412	3,10	0,006	0,005	0,17
2,36	0,39	3783	3,26	0,007	0,006	0,18
2,41	0,41	3959	3,34	0,007	0,006	0,18
2,45	0,42	4115	3,40	0,007	0,006	0,18
2,51	0,44	4301	3,48	0,007	0,006	0,19
1	0,05	508	1,20	0,002	0,002	0,06

## **APÊNDICE B**

### **DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE E RESISTÊNCIA ESPECÍFICA DOS MEIOS FILTRANTES**

## APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE E RESISTÊNCIA ESPECÍFICA DOS MEIOS FILTRANTES

Para determinar a permeabilidade de casa tecido utilizado, polipropileno, poliéster e acrílico foi necessário à utilização de um manômetro tipo U, na qual, as tomadas de pressão eram conectadas na caixa de filtração antes e após o filtro, completamente limpo, fixado no módulo de filtração e outra tomada de pressão a jusante e a montante da placa de orifício previamente calibrada.

O filtro era submetido à variação da velocidade superficial de filtração e os valores de queda de pressão na saída e entrada do mesmo eram coletados para determinar a permeabilidade ao ar dos meios filtrantes através da Equação 2.24 e a resistência específica através da Equação 2.19.

A Tabela B1 representa a calibração da placa de orifício diâmetro de 10 mm e a Tabela B2 representa os dados pra a determinação da permeabilidade ao ar e resistência específica do meio filtrante.

Tabela B1 – Dados para a calibração da placa de orifício diâmetro de 10 mm.

$V_g$ (m / s)	$H$ (m)	$\Delta P$ (Pa)	$V_{ideal}$ (m / s)	$Q_{ideal}$ (m <sup>3</sup> / s)	$Q_{real}$ (m <sup>3</sup> / s)	$V_f$ (m / s)
1,33	0,10	987	1,67	0,003	0,003	0,09
1,45	0,11	1075	1,74	0,004	0,003	0,09
1,56	0,13	1310	1,92	0,004	0,003	0,10
1,67	0,15	1496	2,05	0,004	0,003	0,11
1,88	0,19	1838	2,27	0,005	0,004	0,12
1,9	0,20	1936	2,33	0,005	0,004	0,12
2	0,22	2141	2,45	0,005	0,004	0,13
2,13	0,25	2454	2,63	0,005	0,004	0,14
2,22	0,29	2796	2,81	0,006	0,005	0,14
1,33	0,10	987	1,67	0,003	0,003	0,09
1,45	0,11	1075	1,74	0,004	0,003	0,09
1,56	0,13	1310	1,92	0,004	0,003	0,10

Tabela B2 – Dados de permeabilidade ao ar do meios filtrantes

$V_f$ (m/s)	$\Delta P$ (Pa)	PP $k_m(m^2)$	PE $k_m(m^2)$	AC $k_m(m^2)$	PP $Re = \frac{\rho V k^{0,5}}{\mu}$	PE $Re = \frac{\rho V k^{0,5}}{\mu}$	AC $Re = \frac{\rho V k^{0,5}}{\mu}$
0,08	117	2,81E-11	5,82E-11	7,17E-11	0,03	0,03	0,04
0,09	137	2,63E-11	6,39E-11	-	0,03	0,04	-
0,10			5,85E-11	-	-	0,04	-
0,11	166	2,62E-11	5,65E-11	7,93E-11	0,03	0,04	0,05
0,12	186	2,52E-11	6,07E-11	7,26E-11	0,03	0,05	0,05
0,13	186	2,67E-11	6,17E-11	7,67E-11	0,04	0,05	0,05
0,14	205	2,60E-11	-	7,06E-11	0,04	-	0,06
0,14	215	2,61E-11	6,20E-11	7,72E-11	0,04	0,06	0,06
0,15	225	2,64E-11	5,81E-11	-	0,04	0,06	-
0,16	244	2,58E-11	6,17E-11	7,30E-11	0,05	0,06	0,07
0,16	254	2,54E-11	-	7,71E-11	0,05	-	0,07
0,17	264	2,55E-11	6,13E-11	7,63E-11	0,05	0,07	0,08
0,18	274	2,53E-11	5,88E-11	-	0,05	0,07	-
0,18	283	2,53E-11	6,03E-11	-	0,05	0,08	-
0,19	293	2,54E-11	6,33E-11	7,22E-11	0,05	0,08	0,08
0,19	293	2,60E-11	-	7,42E-11	0,06	-	0,09
0,20			-	7,67E-11	-	-	0,09
0,20	313	2,56E-11	5,88E-11	-	0,06	0,09	-
0,20	313	2,57E-11	5,99E-11	7,35E-11	0,06	0,09	0,09

**APÊNDICE C**  
**DADOS DE FILTRAÇÃO E POROSIDADE**

APÊNDICE C - DADOS DE FILTRAÇÃO E POROSIDADE

Tabela C1 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,213 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	88	0	1	1	1	1
30	342	0,09	0,37	0,39	0,37	0,39
60	684	0,18	0,37	0,39	0,37	0,39
72	978	0,21	0,35	0,37	0,35	0,37

Tabela C2 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,373 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	48,8771	0	1	1	1	1
30	293,263	0,08409	0,38	0,40	0,38	0,40
60	635,402	0,16818	0,37	0,39	0,37	0,39
90	1026,42	0,25227	0,36	0,38	0,36	0,38

Tabela C3 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,572 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	108	0,00	1	1	1	1
30	283	0,08	0,37	0,39	0,37	0,39
60	489	0,16	0,39	0,41	0,39	0,41
90	899	0,23	0,37	0,39	0,37	0,39
120	1212	0,31	0,37	0,38	0,37	0,38
150	1632	0,39	0,36	0,38	0,36	0,38
180	2405	0,47	0,34	0,36	0,34	0,36
222	3138	0,58	0,33	0,35	0,33	0,35



Tabela C4 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,575 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	98	0,00	1	1	1	1
30	244	0,09	0,40	0,42	0,40	0,42
60	440	0,18	0,41	0,43	0,41	0,43
90	1046	0,26	0,36	0,38	0,36	0,38
120	1857	0,35	0,34	0,35	0,34	0,35
150	2102	0,44	0,35	0,36	0,35	0,36
180	2542	0,53	0,34	0,36	0,34	0,36
195	2933	0,57	0,34	0,36	0,34	0,36

Tabela C5 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,80 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	68	0	1	1	1	1
30	235	0,09	0,41	0,43	0,41	0,43
60	479	0,18	0,40	0,42	0,40	0,42
90	733	0,27	0,40	0,42	0,40	0,42
120	938	0,35	0,41	0,43	0,41	0,43
150	2297	0,44	0,34	0,36	0,34	0,36
180	2727	0,53	0,34	0,36	0,34	0,36
210	3030	0,62	0,34	0,36	0,34	0,36
240	3490	0,71	0,34	0,36	0,34	0,36
272	4109	0,80	0,34	0,36	0,34	0,36

Tabela C6 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,779 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	107	0	1	1	1	1
30	234	0,07	0,38	0,40	0,38	0,40
60	430	0,14	0,39	0,41	0,39	0,41
90	684	0,21	0,38	0,40	0,38	0,40
120	1017	0,27	0,37	0,39	0,37	0,39
150	1408	0,34	0,36	0,38	0,36	0,38
180	1702	0,41	0,36	0,38	0,36	0,38
210	1898	0,48	0,36	0,38	0,36	0,38
240	2240	0,55	0,36	0,38	0,36	0,38
270	2632	0,62	0,36	0,37	0,36	0,37
300	3092	0,68	0,35	0,37	0,35	0,37
330	3561	0,75	0,35	0,36	0,35	0,36
342	3904	0,78	0,34	0,36	0,34	0,36

Tabela C7 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,17 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	108	0	1	1	1	1
30	655	0,12	0,37	0,39	0,37	0,39
45	968	0,17	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C8 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,240 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	88	0	1	1	1	1
30	733	0,13	0,37	0,39	0,37	0,39
56	1955	0,24	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C9 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,269 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	117	0	1	1	1	1
30	909	0,13	0,35	0,37	0,35	0,37
60	2151	0,27	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C10 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,316 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	127	0	1	1	1	1
30	411	0,12	0,42	0,44	0,42	0,44
60	1672	0,43	0,34	0,36	0,34	0,36
82	3040	0,32	0,32	0,33	0,32	0,33

Tabela C11 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075$  m/s e  $W=0,327$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	98	0	1	1	1	1
30	782	0,13	0,36	0,38	0,36	0,38
60	1936	0,26	0,34	0,36	0,34	0,36
76	2933	0,33	0,32	0,34	0,32	0,34

Tabela C12 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075$  m/s e  $W= 0,502$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	166	0	1	1	1	1
30	684	0,13	0,38	0,40	0,38	0,40
60	1730	0,26	0,35	0,37	0,35	0,37
90	2688	0,39	0,35	0,37	0,35	0,37
115	4106	0,50	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C13 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075$  m/s e  $W= 0,503$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	127	0	1	1	1	1
30	499	0,13	0,41	0,43	0,41	0,43
60	1398	0,27	0,38	0,40	0,38	0,40
90	2786	0,40	0,35	0,37	0,35	0,37
113	3920	0,50	0,34	0,36	0,34	0,35

Tabela C14 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01$  m/s e  $W = 0,138$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	166	0	1	1	1	1
23	1026	0,14	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C15 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01$  m/s e  $W = 0,121$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	156	0	1	1	1	1
26	978	0,12	0,36	0,38	0,36	0,38

Tabela C16 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01$  m/s e  $W = 0,215$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	117	0	1	1	1	1
30	1222	0,16	0,37	0,39	0,37	0,39
41	1955	0,22	0,35	0,37	0,35	0,37

Tabela C17 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01$  m/s e  $W = 0,180$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	156	0	1	1	1	1
30	1435	0,13	0,33	0,35	0,33	0,35
41	1955	0,18	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C18 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,258 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	117	0	1	1	1	1
30	1085	0,16	0,38	0,40	0,38	0,40
48	2942	0,26	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C19 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,270 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	215	0	1	1	1	1
30	1085	0,15	0,38	0,39	0,38	0,39
53	2962	0,27	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C20 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,381 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	196	0	1	1	1	1
30	577	0,16	0,45	0,47	0,45	0,47
60	2776	0,32	0,36	0,37	0,36	0,37
71	3871	0,38	0,34	0,36	0,34	0,36

Tabela C21 – Dados de filtração para o polipropileno e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,367 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	274	0	1	1	1	1
30	1447	0,19	0,37	0,39	0,37	0,39
58	3910	0,36	0,33	0,35	0,33	0,35

Tabela C22– Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,317 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	20	0	1	1	1	1
30	98	0,08	0,50	0,52	0,50	0,52
60	293	0,16	0,45	0,47	0,45	0,47
90	626	0,24	0,41	0,43	0,41	0,43
121	978	0,32	0,39	0,41	0,39	0,41

Tabela C23 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,305 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	20	0	1	1	1	1
30	98	0,07	0,46	0,49	0,46	0,49
60	215	0,14	0,45	0,47	0,45	0,47
90	469	0,20	0,41	0,43	0,41	0,43
120	606	0,27	0,41	0,43	0,41	0,43
135	978	0,31	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C24 – Dados de filtração para o polipropileno e poliéster de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,487 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	20	0	1	1	1	1
30	244	0,09	0,41	0,43	0,41	0,43
60	420	0,19	0,43	0,45	0,43	0,45
90	860	0,28	0,39	0,41	0,39	0,41
120	1320	0,38	0,38	0,40	0,38	0,40
154	2151	0,49	0,35	0,37	0,35	0,37

Tabela C25 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,635 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	20	0	1	1	1	1
30	196	0,09	0,42	0,45	0,42	0,45
60	557	0,17	0,39	0,41	0,39	0,41
90	1007	0,26	0,37	0,39	0,37	0,39
120	1662	0,35	0,34	0,36	0,34	0,36
150	2053	0,43	0,35	0,36	0,35	0,36
180	2737	0,52	0,34	0,35	0,34	0,35
220	3128	0,64	0,34	0,36	0,34	0,36



Tabela C26 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,731 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	78	0,09	0,53	0,55	0,53	0,55
60	499	0,18	0,43	0,45	0,43	0,45
90	1046	0,27	0,42	0,44	0,42	0,44
120	1202	0,36	0,38	0,40	0,38	0,40
150	1818	0,46	0,37	0,39	0,37	0,38
180	2590	0,55	0,35	0,37	0,35	0,37
210	3177	0,64	0,34	0,36	0,34	0,36
241	3959	0,73	0,34	0,35	0,34	0,35

Tabela C27 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,764 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	108	0,10	0,51	0,53	0,51	0,53
60	342	0,19	0,45	0,47	0,45	0,47
90	450	0,29	0,47	0,49	0,47	0,49
120	1369	0,38	0,37	0,39	0,37	0,39
150	1808	0,48	0,37	0,39	0,37	0,39
180	2532	0,58	0,35	0,37	0,35	0,37
210	3177	0,67	0,35	0,36	0,35	0,36
239	3881	0,76	0,34	0,36	0,34	0,36

Tabela C28 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,249 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	303	0,11	0,45	0,47	0,45	0,47
60	860	0,22	0,41	0,43	0,41	0,43
68	1007	0,25	0,40	0,43	0,40	0,42

Tabela C29 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,250 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	78	0	1,00	1,00	1,00	1,00
30	293	0,10	0,44	0,47	0,44	0,47
60	684	0,21	0,43	0,45	0,43	0,45
73	978	0,25	0,41	0,43	0,41	0,43

Tabela C30 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,439 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	49	0	1	1	1	1
30	244	0,10	0,46	0,49	0,46	0,49
60	675	0,20	0,43	0,45	0,43	0,45
90	1163	0,30	0,41	0,43	0,41	0,43
120	1857	0,40	0,39	0,41	0,39	0,41
131	1994	0,44	0,39	0,41	0,39	0,41

Tabela C31 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,520 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1,00	1,00	1,00	1,00
30	274	0,12	0,47	0,49	0,47	0,49
60	850	0,23	0,42	0,44	0,42	0,44
90	1593	0,35	0,39	0,41	0,39	0,41
120	2542	0,47	0,37	0,39	0,37	0,39
133	2982	0,52	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C32 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,538 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	225	0,10	0,48	0,51	0,48	0,51
60	811	0,21	0,41	0,43	0,41	0,43
90	1378	0,31	0,40	0,42	0,40	0,42
120	2111	0,41	0,39	0,40	0,38	0,40
157	2991	0,54	0,38	0,40	0,38	0,40

Tabela C33 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075$  m/s e  $W = 0,681$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	342	0,12	0,46	0,48	0,46	0,48
60	1026	0,23	0,41	0,43	0,41	0,43
90	1916	0,35	0,39	0,40	0,38	0,40
120	2620	0,47	0,38	0,40	0,38	0,40
150	3373	0,59	0,38	0,40	0,38	0,40
174	3959	0,68	0,38	0,40	0,38	0,40

Tabela C34 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01$  m/s e  $W = 0,195$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	59	0	1	1	1	1
30	596	0,15	0,44	0,46	0,44	0,46
39	1017	0,20	0,41	0,43	0,41	0,43

Tabela C35 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01$  m/s e  $W = 0,196$  Kg/m<sup>2</sup>

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	49	0	1	1	1	1
30	479	0,14	0,45	0,48	0,45	0,48
43	997	0,20	0,41	0,43	0,41	0,43

Tabela C36 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,318 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	508	0,13	0,44	0,46	0,44	0,46
60	1339	0,26	0,41	0,43	0,41	0,43
73	1994	0,32	0,39	0,41	0,39	0,41

Tabela C37 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,30 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	59	0	1	1	1	1
30	587	0,12	0,42	0,44	0,42	0,44
60	1515	0,24	0,39	0,41	0,39	0,41
73	2053	0,30	0,38	0,40	0,38	0,40

Tabela C38 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,423 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	538	0,14	0,44	0,46	0,44	0,46
60	1417	0,28	0,41	0,43	0,41	0,43
92	3021	0,42	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C39 – Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,401 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	606	0,13	0,42	0,44	0,42	0,44
60	1711	0,26	0,38	0,40	0,38	0,40
92	2982	0,40	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C40– Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,502 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	78	0	1	1	1	1
30	587	0,13	0,42	0,44	0,42	0,44
60	1515	0,26	0,39	0,41	0,39	0,41
90	2590	0,39	0,38	0,40	0,38	0,40
117	4008	0,50	0,36	0,38	0,36	0,38

Tabela C41– Dados de filtração para o poliéster e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,01 \text{ m/s}$  e  $W = 0,480 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	49	0	1	1	1	1
30	508	0,14	0,45	0,48	0,45	0,47
60	1672	0,29	0,40	0,42	0,40	0,42
90	2864	0,43	0,38	0,40	0,38	0,40
100	3939	0,48	0,36	0,38	0,36	0,38

Tabela C42– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,554 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	10	0,08	0,79	0,81	0,79	0,81
60	108	0,16	0,57	0,60	0,57	0,60
90	225	0,23	0,53	0,55	0,53	0,55
120	332	0,31	0,51	0,54	0,51	0,54
150	479	0,39	0,50	0,52	0,50	0,52
180	753	0,47	0,46	0,49	0,46	0,49
214	968	0,55	0,45	0,48	0,45	0,48

Tabela C43– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,564 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	29	0,08	0,65	0,68	0,65	0,68
60	127	0,16	0,55	0,58	0,55	0,58
90	254	0,24	0,52	0,54	0,51	0,54
120	352	0,32	0,51	0,53	0,51	0,53
150	557	0,40	0,48	0,50	0,48	0,50
180	811	0,48	0,46	0,48	0,46	0,48
213	968	0,56	0,46	0,48	0,46	0,48

Tabela C44– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,731 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	39	0,06	0,58	0,61	0,58	0,61
60	88	0,12	0,57	0,59	0,57	0,59
90	205	0,19	0,51	0,53	0,51	0,53
120	313	0,25	0,49	0,52	0,49	0,52
150	547	0,31	0,45	0,48	0,45	0,48
180	694	0,37	0,45	0,47	0,45	0,47
210	899	0,44	0,43	0,46	0,43	0,46
240	1056	0,50	0,43	0,45	0,43	0,45
270	1261	0,56	0,42	0,45	0,42	0,45
300	1466	0,62	0,42	0,44	0,42	0,44
330	1701	0,68	0,41	0,43	0,41	0,43
353	1926	0,73	0,41	0,43	0,41	0,43

Tabela C45– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,780 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	49	0,07	0,58	0,60	0,58	0,60
60	108	0,15	0,56	0,59	0,56	0,59
90	186	0,22	0,55	0,57	0,54	0,57
120	323	0,29	0,51	0,53	0,51	0,53
150	479	0,37	0,49	0,51	0,49	0,51
180	665	0,44	0,47	0,49	0,47	0,49
210	850	0,51	0,46	0,48	0,46	0,48
240	1261	0,59	0,43	0,45	0,43	0,45
270	1437	0,66	0,43	0,45	0,43	0,45
300	1662	0,73	0,42	0,45	0,42	0,45
318	1945	0,78	0,41	0,43	0,41	0,43



Tabela C46– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,814 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	59	0,08	0,56	0,59	0,56	0,59
60	156	0,16	0,53	0,55	0,53	0,55
90	332	0,24	0,48	0,50	0,48	0,50
120	528	0,32	0,46	0,48	0,46	0,48
150	547	0,40	0,48	0,51	0,48	0,51
180	1193	0,48	0,41	0,43	0,41	0,43
210	1525	0,56	0,40	0,42	0,40	0,42
240	19160	0,64	0,20	0,21	0,20	0,21
270	2327	0,72	0,38	0,40	0,38	0,40
300	2815	0,80	0,38	0,40	0,38	0,39
307	2952	0,81	0,36	0,37	0,36	0,37

Tabela C47– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,830 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	29	0,07	0,63	0,66	0,63	0,66
60	137	0,13	0,52	0,54	0,52	0,54
90	303	0,20	0,47	0,49	0,47	0,49
120	469	0,27	0,45	0,48	0,45	0,48
150	675	0,34	0,44	0,46	0,44	0,46
180	1046	0,40	0,41	0,43	0,41	0,43
210	1222	0,47	0,41	0,43	0,41	0,43
240	1486	0,54	0,40	0,42	0,40	0,42
270	1867	0,60	0,39	0,41	0,39	0,41
300	2239	0,67	0,38	0,40	0,38	0,40
330	2522	0,74	0,38	0,40	0,38	0,40
371	2962	0,83	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C48– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,05 \text{ m/s}$  e  $W = 0,982 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	59	0,07	0,55	0,58	0,55	0,58
60	156	0,15	0,52	0,54	0,52	0,54
90	313	0,22	0,48	0,50	0,48	0,50
120	508	0,30	0,46	0,48	0,46	0,48
150	743	0,37	0,44	0,46	0,44	0,46
180	1036	0,45	0,42	0,44	0,42	0,44
210	1329	0,52	0,41	0,43	0,41	0,43
240	1584	0,60	0,41	0,43	0,41	0,43
270	1975	0,67	0,40	0,42	0,40	0,42
300	2248	0,75	0,39	0,41	0,39	0,41
330	2483	0,82	0,39	0,41	0,39	0,41
360	2757	0,89	0,39	0,41	0,39	0,41
390	3187	0,97	0,38	0,40	0,38	0,40
395	3910	0,98	0,36	0,38	0,36	0,38

Tabela C49– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,250 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	10	0	1	1	1	1
30	117	0,08	0,52	0,54	0,52	0,54
60	411	0,15	0,45	0,47	0,45	0,47
90	899	0,23	0,41	0,43	0,41	0,43
98	997	0,25	0,41	0,43	0,41	0,43

Tabela C50– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,235 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	20	0	1	1	1	1
30	117	0,06	0,50	0,52	0,50	0,52
60	332	0,13	0,46	0,48	0,46	0,48
90	704	0,19	0,42	0,44	0,42	0,44
110	978	0,24	0,40	0,42	0,40	0,42

Tabela C51– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,545 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	20	0	1	1	1	1
30	108	0,10	0,57	0,59	0,57	0,59
60	381	0,20	0,49	0,52	0,49	0,52
90	723	0,30	0,47	0,49	0,47	0,49
120	1114	0,40	0,45	0,47	0,45	0,47
150	1652	0,50	0,43	0,45	0,43	0,45
162	1916	0,55	0,42	0,44	0,42	0,44

Tabela C52– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,558 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	117	0,12	0,59	0,62	0,59	0,62
60	381	0,25	0,53	0,55	0,53	0,55
90	802	0,37	0,49	0,51	0,49	0,51
120	1398	0,49	0,45	0,48	0,45	0,48
136	1984	0,56	0,43	0,45	0,43	0,45

Tabela C53– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,607 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	88	0,09	0,57	0,60	0,57	0,60
60	323	0,19	0,50	0,52	0,50	0,52
90	616	0,28	0,47	0,49	0,47	0,49
120	1007	0,38	0,44	0,46	0,44	0,46
150	1300	0,47	0,44	0,46	0,44	0,46
180	1691	0,57	0,43	0,45	0,43	0,45
193	1906	0,61	0,42	0,44	0,42	0,44

Tabela C54– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,699 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	78	0,07	0,71	0,73	0,71	0,73
60	235	0,14	0,65	0,68	0,65	0,68
90	518	0,21	0,60	0,63	0,60	0,63
120	811	0,28	0,58	0,60	0,58	0,60
150	1105	0,36	0,57	0,59	0,57	0,59
180	1427	0,43	0,56	0,58	0,56	0,58
210	1818	0,50	0,55	0,57	0,55	0,57
240	2199	0,57	0,54	0,56	0,54	0,56
270	2493	0,64	0,54	0,56	0,54	0,56
295	2903	0,70	0,53	0,55	0,53	0,55

Tabela C55– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,702 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	59	0,08	0,74	0,77	0,74	0,77
60	215	0,17	0,66	0,69	0,66	0,69
90	616	0,25	0,58	0,60	0,58	0,60
120	958	0,34	0,56	0,58	0,56	0,58
150	1339	0,42	0,54	0,57	0,54	0,57
180	1740	0,50	0,53	0,56	0,53	0,56
210	1945	0,59	0,54	0,56	0,54	0,56
240	2678	0,67	0,51	0,54	0,51	0,54
251	2913	0,70	0,51	0,53	0,51	0,53

Tabela C56– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,827 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	29	0	1	1	1	1
30	166	0,08	0,49	0,51	0,49	0,51
60	391	0,17	0,47	0,49	0,47	0,49
90	704	0,25	0,45	0,47	0,45	0,47
120	1222	0,33	0,42	0,44	0,41	0,44
150	1623	0,41	0,41	0,43	0,41	0,43
180	2024	0,50	0,40	0,42	0,40	0,42
210	2463	0,58	0,40	0,42	0,40	0,42
240	2815	0,66	0,40	0,42	0,40	0,42
270	3402	0,75	0,39	0,41	0,39	0,41
299	3939	0,83	0,39	0,41	0,39	0,41

Tabela C57– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,075 \text{ m/s}$  e  $W = 0,803 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	108	0,07	0,52	0,54	0,52	0,54
60	303	0,14	0,48	0,50	0,48	0,50
90	479	0,21	0,47	0,49	0,47	0,49
120	1046	0,28	0,41	0,43	0,41	0,43
150	1290	0,35	0,42	0,44	0,42	0,44
180	1623	0,42	0,41	0,43	0,41	0,43
210	2043	0,49	0,40	0,42	0,40	0,42
240	2590	0,56	0,39	0,41	0,39	0,41
270	2972	0,63	0,39	0,41	0,39	0,41
300	3363	0,70	0,39	0,41	0,39	0,41
330	3705	0,77	0,39	0,41	0,39	0,41
343	3939	0,80	0,38	0,40	0,38	0,40

Tabela C58– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,183 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	205	0,08	0,49	0,52	0,49	0,52
60	665	0,16	0,44	0,46	0,44	0,46
68	987	0,18	0,40	0,43	0,40	0,43

Tabela C59– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,197 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	156	0,08	0,52	0,54	0,52	0,54
60	635	0,15	0,43	0,46	0,43	0,46
77	1007	0,20	0,41	0,43	0,41	0,43

Tabela C60– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,225 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	381	0,06	0,39	0,41	0,39	0,41
60	684	0,12	0,40	0,42	0,40	0,42
90	1437	0,18	0,36	0,38	0,36	0,38
113	1984	0,23	0,35	0,37	0,35	0,37

Tabela C61– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,254 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	186	0,06	0,46	0,48	0,46	0,48
60	606	0,11	0,40	0,42	0,40	0,42
90	1241	0,17	0,37	0,39	0,37	0,39
120	1652	0,22	0,37	0,39	0,37	0,39
137	1965	0,25	0,37	0,39	0,37	0,39

Tabela C62– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,330 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	235	0,05	0,41	0,43	0,41	0,43
60	567	0,09	0,39	0,41	0,39	0,41
90	1026	0,14	0,37	0,39	0,37	0,39
120	1447	0,19	0,37	0,38	0,37	0,38
150	1887	0,23	0,36	0,38	0,36	0,38
180	2571	0,28	0,35	0,37	0,35	0,37
213	2962	0,33	0,35	0,37	0,35	0,37

Tabela C63– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,293 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	283	0,05	0,40	0,42	0,40	0,42
60	743	0,10	0,37	0,39	0,37	0,39
90	1251	0,15	0,36	0,38	0,36	0,38
120	1926	0,20	0,35	0,36	0,34	0,36
150	2424	0,25	0,34	0,36	0,34	0,36
175	3011	0,29	0,34	0,36	0,34	0,36



Tabela C64– Dados de filtração para o acrílico e porosidade de tortas de filtração para  $V_f = 0,10 \text{ m/s}$  e  $W = 0,623 \text{ Kg/m}^2$

Tempo de filtração (s)	$\Delta P$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	Porosidade Ergun (1952)	Porosidade MacDonald	Porosidade Ergun modificada	Porosidade Kozeny-Carman
0	39	0	1	1	1	1
30	117	0,09	0,57	0,60	0,57	0,60
60	274	0,17	0,55	0,58	0,55	0,57
90	1193	0,26	0,42	0,44	0,42	0,44
120	1838	0,34	0,40	0,43	0,40	0,42
150	2571	0,43	0,39	0,41	0,39	0,41
180	3197	0,51	0,39	0,41	0,39	0,41
210	3676	0,60	0,39	0,41	0,39	0,41
220	3939	0,62	0,39	0,41	0,39	0,41

## **APÊNDICE D**

**Determinação da massa da torta de filtração, fração de massa retida e fração de massa removida**

APÊNDICE D – Determinação da massa da torta de filtração, fração de massa retida e fração de massa removida

Dados para cálculo:

M1= Massa do filtro antes da filtração

M2= Massa do filtro com a torta

M3= Massa do filtro com a torta - massa do filtro antes da filtração

M4= Massa da folha de papel

M5= Massa de pó removida + massa do papel

M6= Massa de pó+papel-massa do papel

M7= Massa do tecido com torta após a limpeza - massa do tecido antes da filtração

M8= Massa total da torta

Tabela D1 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante polipropileno, velocidade superficial de filtração de 0,05 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$2,13.10^{-1}$	$3,22.10^{-2}$	$3,29.10^{-2}$	$7,07.10^{-4}$	$4,80.10^{-3}$
2000	$3,73.10^{-1}$	$3,04.10^{-2}$	$3,11.10^{-2}$	$6,68.10^{-4}$	$4,80.10^{-3}$
3000	$5,75.10^{-1}$	$3,15.10^{-2}$	$3,21.10^{-2}$	$6,27.10^{-4}$	$4,80.10^{-3}$
3000	$5,72.10^{-1}$	$3,06.10^{-2}$	$3,13.10^{-2}$	$7,79.10^{-4}$	$4,78.10^{-3}$
4000	$8,04.10^{-1}$	$3,16.10^{-2}$	$3,23.10^{-2}$	$6,24.10^{-4}$	$4,79.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$1,08.10^{-2}$	$5,97.10^{-3}$	$7,07.10^{-4}$	$6,68.10^{-3}$	$1,06.10^{-1}$	$8,94.10^{-1}$
$1,58.10^{-2}$	$1,10.10^{-2}$	$6,68.10^{-4}$	$1,17.10^{-2}$	$5,70.10^{-2}$	$9,54.10^{-1}$
$2,22.10^{-2}$	$1,74.10^{-2}$	$6,27.10^{-4}$	$1,81.10^{-2}$	$3,47.10^{-2}$	$9,65.10^{-1}$
$2,20.10^{-2}$	$1,72.10^{-2}$	$7,79.10^{-4}$	$1,80.10^{-2}$	$4,33.10^{-2}$	$9,57.10^{-1}$
$2,94.10^{-2}$	$2,46.10^{-2}$	$6,24.10^{-4}$	$2,53.10^{-2}$	$2,47.10^{-2}$	$9,75.10^{-1}$

Tabela D2 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante polipropileno, velocidade superficial de filtração de 0,075 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$1,73.10^{-1}$	$3,17.10^{-2}$	$3,31.10^{-2}$	$1,43.10^{-3}$	$4,90.10^{-3}$
2000	$2,40.10^{-1}$	$2,93.10^{-2}$	$3,08.10^{-2}$	$1,54.10^{-3}$	$4,89.10^{-3}$
2000	$2,69.10^{-1}$	$3,48.10^{-2}$	$3,55.10^{-2}$	$7,01.10^{-4}$	$4,85.10^{-3}$
3000	$3,16.10^{-1}$	$3,18.10^{-2}$	$3,26.10^{-2}$	$7,90.10^{-4}$	$4,85.10^{-3}$
3000	$3,28.10^{-1}$	$3,10.10^{-2}$	$3,20.10^{-2}$	$1,01.10^{-3}$	$4,81.10^{-3}$
4000	$5,03.10^{-1}$	$3,03.10^{-2}$	$3,10.10^{-2}$	$7,08.10^{-4}$	$4,81.10^{-3}$
4000	$5,03.10^{-1}$	$3,18.10^{-2}$	$3,27.10^{-2}$	$9,34.10^{-4}$	$4,85.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$8,92.10^{-3}$	$4,02.10^{-3}$	$1,43.10^{-3}$	$5,45.10^{-3}$	$2,63.10^{-1}$	$7,37.10^{-1}$
$1,09.10^{-2}$	$6,00.10^{-3}$	$1,54.10^{-3}$	$7,54.10^{-3}$	$2,05.10^{-1}$	$7,95.10^{-1}$
$1,26.10^{-2}$	$7,74.10^{-3}$	$7,01.10^{-4}$	$8,44.10^{-3}$	$8,30.10^{-2}$	$9,17.10^{-1}$
$1,58.10^{-2}$	$1,09.10^{-2}$	$7,90.10^{-4}$	$1,17.10^{-2}$	$6,75.10^{-2}$	$9,33.10^{-1}$
$1,41.10^{-2}$	$9,28.10^{-3}$	$1,01.10^{-3}$	$1,03.10^{-2}$	$9,81.10^{-2}$	$9,02.10^{-1}$
$1,99.10^{-2}$	$1,51.10^{-2}$	$7,08.10^{-4}$	$1,58.10^{-2}$	$4,48.10^{-2}$	$9,55.10^{-1}$
$1,97.10^{-2}$	$1,49.10^{-2}$	$9,34.10^{-4}$	$1,58.10^{-2}$	$5,91.10^{-2}$	$9,41.10^{-1}$

Tabela D3 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante polipropileno, velocidade superficial de filtração de 0,10 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$1,38.10^{-1}$	$3,02.10^{-2}$	$3,13.10^{-2}$	$1,16.10^{-3}$	$4,80.10^{-3}$
2000	$2,16.10^{-1}$	$2,90.10^{-2}$	$3,07.10^{-2}$	$1,75.10^{-3}$	$4,78.10^{-3}$
2000	$1,81.10^{-1}$	$3,04.10^{-2}$	$3,18.10^{-2}$	$1,40.10^{-3}$	$4,76.10^{-3}$
3000	$2,58.10^{-1}$	$3,15.10^{-2}$	$3,33.10^{-2}$	$1,77.10^{-3}$	$4,88.10^{-3}$
3000	$2,70.10^{-1}$	$3,22.10^{-2}$	$3,32.10^{-2}$	$9,55.10^{-4}$	$4,83.10^{-3}$
4000	$3,81.10^{-1}$	$3,07.10^{-2}$	$3,15.10^{-2}$	$8,48.10^{-4}$	$4,78.10^{-3}$
4000	$3,64.10^{-1}$	$3,14.10^{-2}$	$3,23.10^{-2}$	$8,60.10^{-4}$	$4,81.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$7,98.10^{-3}$	$3,19.10^{-3}$	$1,16.10^{-3}$	$4,35.10^{-3}$	$2,67.10^{-1}$	$7,33.10^{-1}$
$9,76.10^{-3}$	$5,02.10^{-3}$	$1,75.10^{-3}$	$6,77.10^{-3}$	$2,58.10^{-1}$	$7,42.10^{-1}$
$9,04.10^{-3}$	$4,28.10^{-3}$	$1,40.10^{-3}$	$5,67.10^{-3}$	$2,46.10^{-1}$	$7,54.10^{-1}$
$1,12.10^{-2}$	$6,33.10^{-3}$	$1,77.10^{-3}$	$8,10.10^{-3}$	$2,19.10^{-1}$	$7,81.10^{-1}$
$1,24.10^{-2}$	$7,54.10^{-3}$	$9,55.10^{-4}$	$8,50.10^{-3}$	$1,12.10^{-1}$	$8,88.10^{-1}$
$1,59.10^{-2}$	$1,11.10^{-2}$	$8,48.10^{-4}$	$1,20.10^{-2}$	$7,08.10^{-2}$	$9,29.10^{-1}$
$1,54.10^{-2}$	$1,06.10^{-2}$	$8,60.10^{-4}$	$1,14.10^{-2}$	$7,53.10^{-2}$	$9,25.10^{-1}$

Tabela D4 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante poliéster, velocidade superficial de filtração de 0,05 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$3,17.10^{-1}$	$3,09.10^{-2}$	$3,23.10^{-2}$	$1,41.10^{-3}$	$4,79.10^{-3}$
2000	$3,05.10^{-1}$	$2,88.10^{-2}$	$3,10.10^{-2}$	$2,15.10^{-3}$	$4,69.10^{-3}$
2000	$4,87.10^{-1}$	$3,32.10^{-2}$	$3,42.10^{-2}$	$9,81.10^{-4}$	$4,75.10^{-3}$
3000	$6,35.10^{-1}$	$3,31.10^{-2}$	$3,40.10^{-2}$	$8,59.10^{-4}$	$4,76.10^{-3}$
3000	$7,31.10^{-1}$	$3,02.10^{-2}$	$3,11.10^{-2}$	$9,68.10^{-4}$	$4,81.10^{-3}$
4000	$7,64.10^{-1}$	$3,00.10^{-2}$	$3,14.10^{-2}$	$1,39.10^{-3}$	$4,76.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$1,33.10^{-2}$	$8,56.10^{-3}$	$1,41.10^{-3}$	$9,96.10^{-3}$	$1,41.10^{-1}$	$8,59.10^{-1}$
$1,11.10^{-2}$	$6,38.10^{-3}$	$2,15.10^{-3}$	$8,53.10^{-3}$	$2,52.10^{-1}$	$7,48.10^{-1}$
$1,91.10^{-2}$	$1,43.10^{-2}$	$9,81.10^{-4}$	$1,53.10^{-2}$	$6,42.10^{-2}$	$9,36.10^{-1}$
$2,39.10^{-2}$	$1,91.10^{-2}$	$8,59.10^{-4}$	$2,00.10^{-2}$	$4,30.10^{-2}$	$9,57.10^{-1}$
$2,68.10^{-2}$	$2,20.10^{-2}$	$9,68.10^{-4}$	$2,30.10^{-2}$	$4,21.10^{-2}$	$9,58.10^{-1}$
$2,74.10^{-2}$	$2,26.10^{-2}$	$1,39.10^{-3}$	$2,40.10^{-2}$	$5,79.10^{-2}$	$9,42.10^{-1}$

Tabela D5 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante poliéster, velocidade superficial de filtração de 0,075 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$2,49.10^{-1}$	$3,23.10^{-2}$	$3,59.10^{-2}$	$3,57.10^{-3}$	$4,83.10^{-3}$
1000	$2,50.10^{-1}$	$3,22.10^{-2}$	$3,42.10^{-2}$	$2,02.10^{-3}$	$4,80.10^{-3}$
2000	$4,40.10^{-1}$	$2,99.10^{-2}$	$3,09.10^{-2}$	$9,68.10^{-4}$	$4,79.10^{-3}$
3000	$5,21.10^{-1}$	$2,86.10^{-2}$	$3,02.10^{-2}$	$1,53.10^{-3}$	$4,88.10^{-3}$
3000	$5,38.10^{-1}$	$3,08.10^{-2}$	$3,19.10^{-2}$	$1,18.10^{-3}$	$4,71.10^{-3}$
4000	$7,64.10^{-1}$	$3,05.10^{-2}$	$3,18.10^{-2}$	$1,21.10^{-3}$	$4,77.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$9,07.10^{-3}$	$4,24.10^{-3}$	$3,57.10^{-3}$	$7,82.10^{-3}$	$4,57.10^{-1}$	$5,43.10^{-1}$
$1,06.10^{-2}$	$5,84.10^{-3}$	$2,02.10^{-3}$	$7,86.10^{-3}$	$2,57.10^{-1}$	$7,43.10^{-1}$
$1,76.10^{-2}$	$1,28.10^{-2}$	$9,68.10^{-4}$	$1,38.10^{-2}$	$7,01.10^{-1}$	$9,30.10^{-1}$
$1,97.10^{-2}$	$1,48.10^{-2}$	$1,53.10^{-3}$	$1,64.10^{-2}$	$9,35.10^{-2}$	$9,06.10^{-1}$
$2,04.10^{-2}$	$1,57.10^{-2}$	$1,18.10^{-3}$	$1,69.10^{-2}$	$6,98.10^{-2}$	$9,30.10^{-1}$
$3,01.10^{-2}$	$2,53.10^{-2}$	$1,21.10^{-3}$	$2,65.10^{-2}$	$4,55.10^{-2}$	$9,55.10^{-1}$

Tabela D6 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante poliéster, velocidade superficial de filtração de 0,10 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$1,96.10^{-1}$	$3,14.10^{-2}$	$3,39.10^{-2}$	$2,49.10^{-3}$	$4,77.10^{-3}$
1000	$1,96.10^{-1}$	$3,13.10^{-2}$	$3,40.10^{-2}$	$2,76.10^{-3}$	$4,87.10^{-3}$
2000	$3,18.10^{-1}$	$3,62.10^{-2}$	$3,79.10^{-2}$	$1,74.10^{-3}$	$4,73.10^{-3}$
2000	$2,97.10^{-1}$	$3,00.10^{-2}$	$3,16.10^{-2}$	$1,60.10^{-3}$	$4,73.10^{-3}$
3000	$4,24.10^{-1}$	$3,25.10^{-2}$	$3,46.10^{-2}$	$2,09.10^{-3}$	$4,76.10^{-3}$
3000	$4,01.10^{-1}$	$3,09.10^{-2}$	$3,25.10^{-2}$	$1,58.10^{-3}$	$4,82.10^{-3}$
4000	$4,81.10^{-1}$	$3,71.10^{-2}$	$3,83.10^{-2}$	$1,21.10^{-3}$	$4,72.10^{-3}$
4000	$5,02.10^{-1}$	$3,00.10^{-2}$	$3,13.10^{-2}$	$1,26.10^{-3}$	$4,76.10^{-3}$
4000	$4,80.10^{-1}$	$3,16.10^{-2}$	$3,30.10^{-2}$	$1,39.10^{-3}$	$4,80.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$8,42.10^{-3}$	$3,65.10^{-3}$	$2,49.10^{-3}$	$6,14.10^{-3}$	$4,05.10^{-1}$	$5,95.10^{-1}$
$8,27.10^{-3}$	$3,40.10^{-3}$	$2,76.10^{-3}$	$6,16.10^{-3}$	$4,48.10^{-1}$	$5,52.10^{-1}$
$1,30.10^{-2}$	$8,25.10^{-3}$	$1,74.10^{-3}$	$9,99.10^{-3}$	$1,74.10^{-1}$	$8,26.10^{-1}$
$1,25.10^{-2}$	$7,73.10^{-3}$	$1,60.10^{-3}$	$9,33.10^{-3}$	$1,72.10^{-1}$	$8,28.10^{-1}$
$1,60.10^{-2}$	$1,12.10^{-2}$	$2,09.10^{-3}$	$1,33.10^{-2}$	$1,57.10^{-1}$	$8,43.10^{-1}$
$1,59.10^{-2}$	$1,10.10^{-2}$	$1,58.10^{-3}$	$1,26.10^{-2}$	$1,25.10^{-1}$	$8,75.10^{-1}$
$1,86.10^{-2}$	$1,39.10^{-2}$	$1,21.10^{-3}$	$1,51.10^{-2}$	$7,98.10^{-2}$	$9,20.10^{-1}$
$1,90.10^{-2}$	$1,42.10^{-2}$	$1,26.10^{-3}$	$1,55.10^{-2}$	$8,14.10^{-2}$	$9,19.10^{-1}$
$1,85.10^{-2}$	$1,37.10^{-2}$	$1,39.10^{-3}$	$1,51.10^{-2}$	$9,23.10^{-2}$	$9,08.10^{-1}$

Tabela D7 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante acrílico, velocidade superficial de filtração de 0,05 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$5,55.10^{-1}$	$3,55.10^{-2}$	$3,95.10^{-2}$	$4,01.10^{-3}$	$4,74.10^{-3}$
1000	$5,65.10^{-1}$	$3,57.10^{-2}$	$3,94.10^{-2}$	$3,70.10^{-3}$	$4,84.10^{-3}$
2000	$7,31.10^{-1}$	$3,95.10^{-2}$	$4,20.10^{-2}$	$2,44.10^{-3}$	$4,75.10^{-3}$
2000	$7,79.10^{-1}$	$3,61.10^{-2}$	$3,84.10^{-2}$	$2,30.10^{-3}$	$4,83.10^{-3}$
3000	$8,15.10^{-1}$	$3,59.10^{-2}$	$4,01.10^{-2}$	$4,19.10^{-3}$	$4,85.10^{-3}$
3000	$8,31.10^{-1}$	$3,63.10^{-2}$	$4,00.10^{-2}$	$3,67.10^{-3}$	$4,75.10^{-3}$
4000	$9,82.10^{-1}$	$3,64.10^{-2}$	$3,89.10^{-2}$	$2,46.10^{-3}$	$4,78.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$1,82.10^{-2}$	$1,34.10^{-2}$	$4,01.10^{-3}$	$1,74.10^{-2}$	$2,30.10^{-1}$	$7,70.10^{-1}$
$1,89.10^{-2}$	$1,40.10^{-2}$	$3,70.10^{-3}$	$1,77.10^{-2}$	$2,09.10^{-1}$	$7,91.10^{-1}$
$2,53.10^{-2}$	$2,05.10^{-2}$	$2,44.10^{-3}$	$2,30.10^{-2}$	$1,06.10^{-1}$	$8,94.10^{-1}$
$2,70.10^{-2}$	$2,22.10^{-2}$	$2,30.10^{-3}$	$2,45.10^{-2}$	$9,42.10^{-2}$	$9,06.10^{-1}$
$2,63.10^{-2}$	$2,14.10^{-2}$	$4,19.10^{-3}$	$2,56.10^{-2}$	$1,64.10^{-1}$	$8,36.10^{-1}$
$2,72.10^{-2}$	$2,24.10^{-2}$	$3,67.10^{-3}$	$2,61.10^{-2}$	$1,41.10^{-1}$	$8,59.10^{-1}$
$3,32.10^{-2}$	$2,84.10^{-2}$	$2,46.10^{-3}$	$3,09.10^{-2}$	$7,98.10^{-2}$	$9,20.10^{-1}$



Tabela D8 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante acrílico, velocidade superficial de filtração de 0,075 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$2,50.10^{-1}$	$3,72.10^{-2}$	$4,14.10^{-2}$	$4,19.10^{-3}$	$4,90.10^{-3}$
1000	$2,35.10^{-1}$	$3,45.10^{-2}$	$3,84.10^{-2}$	$3,81.10^{-3}$	$4,78.10^{-3}$
2000	$5,45.10^{-1}$	$3,48.10^{-2}$	$3,85.10^{-2}$	$3,68.10^{-3}$	$4,89.10^{-3}$
3000	$7,02.10^{-1}$	$3,52.10^{-2}$	$3,91.10^{-2}$	$3,91.10^{-3}$	$4,80.10^{-3}$
3000	$7,02.10^{-1}$	$3,54.10^{-2}$	$3,89.10^{-2}$	$3,44.10^{-3}$	$4,84.10^{-3}$
4000	$8,27.10^{-1}$	$3,55.10^{-2}$	$3,87.10^{-2}$	$3,26.10^{-3}$	$4,76.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$8,58.10^{-3}$	$3,67.10^{-3}$	$4,19.10^{-3}$	$7,87.10^{-3}$	$5,33.10^{-1}$	$4,67.10^{-1}$
$8,37.10^{-3}$	$3,59.10^{-3}$	$3,81.10^{-3}$	$7,40.10^{-3}$	$5,15.10^{-1}$	$4,85.10^{-1}$
$1,83.10^{-2}$	$1,34.10^{-2}$	$3,68.10^{-3}$	$1,71.10^{-2}$	$2,15.10^{-1}$	$7,85.10^{-1}$
$1,67.10^{-2}$	$1,19.10^{-2}$	$3,91.10^{-3}$	$1,58.10^{-2}$	$2,47.10^{-1}$	$7,53.10^{-1}$
$2,35.10^{-2}$	$1,86.10^{-2}$	$3,44.10^{-3}$	$2,21.10^{-2}$	$1,56.10^{-1}$	$8,44.10^{-1}$
$2,75.10^{-2}$	$2,27.10^{-2}$	$3,26.10^{-3}$	$2,60.10^{-2}$	$1,25.10^{-1}$	$8,75.10^{-1}$

Tabela D9 – Massa da torta de filtração para o meio filtrante acrílico, velocidade superficial de filtração de 0,10 m/s.

$\Delta P_{Máx}$ (Pa)	W (Kg/m <sup>2</sup> )	M1 (Kg)	M2(Kg)	M3 (Kg)	M4 (Kg)
1000	$1,84.10^{-1}$	$3,62.10^{-2}$	$3,96.10^{-2}$	$3,36.10^{-3}$	$4,77.10^{-3}$
1000	$1,97.10^{-1}$	$3,53.10^{-2}$	$3,92.10^{-2}$	$3,90.10^{-3}$	$4,74.10^{-3}$
2000	$2,25.10^{-1}$	$3,65.10^{-2}$	$4,07.10^{-2}$	$4,11.10^{-3}$	$4,79.10^{-3}$
3000	$3,30.10^{-1}$	$3,74.10^{-2}$	$4,16.10^{-2}$	$4,27.10^{-3}$	$4,72.10^{-3}$
3000	$2,93.10^{-1}$	$3,66.10^{-2}$	$4,10.10^{-2}$	$4,40.10^{-3}$	$4,80.10^{-3}$
4000	$6,24.10^{-1}$	$3,82.10^{-2}$	$4,30.10^{-2}$	$4,83.10^{-3}$	$4,73.10^{-3}$

M5 (Kg)	M6 (Kg)	M7 (Kg)	M8 (Kg)	Fração de massa retida	Fração de massa removida
$7,18.10^{-3}$	$2,41.10^{-3}$	$3,36.10^{-3}$	$5,77.10^{-3}$	$5,83.10^{-1}$	$4,17.10^{-1}$
$7,04.10^{-3}$	$2,30.10^{-3}$	$3,90.10^{-3}$	$6,20.10^{-3}$	$6,29.10^{-1}$	$3,71.10^{-1}$
$7,76.10^{-3}$	$2,97.10^{-3}$	$4,11.10^{-3}$	$7,08.10^{-3}$	$5,81.10^{-1}$	$4,19.10^{-1}$
$1,08.10^{-2}$	$6,10.10^{-3}$	$4,27.10^{-3}$	$1,04.10^{-2}$	$4,11.10^{-1}$	$5,89.10^{-1}$
$9,62.10^{-3}$	$4,82.10^{-3}$	$4,40.10^{-3}$	$9,22.10^{-3}$	$4,77.10^{-1}$	$5,23.10^{-1}$
$1,95.10^{-2}$	$1,48.10^{-2}$	$4,83.10^{-3}$	$1,96.10^{-2}$	$2,47.10^{-1}$	$7,53.10^{-1}$