



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**DESEMPENHO DE MEIOS FILTRANTES NA FILTRAÇÃO DE
GASES A ALTAS PRESSÕES**

Eduardo Hiromitsu Tanabe

DEFESA DE DOUTORADO

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**DESEMPENHO DE MEIOS FILTRANTES NA FILTRAÇÃO DE
GASES A ALTAS PRESSÕES**

Eduardo Hiromitsu Tanabe
Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury
Co-orientadora: Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar

Defesa de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**São Carlos – SP
2011**

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

T161dm

Tanabe, Eduardo Hiromitsu.

Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões / Eduardo Hiromitsu Tanabe. -- São Carlos : UFSCar, 2011.

150 f.

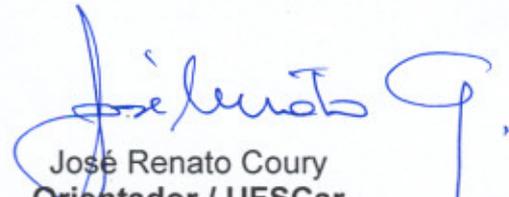
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2011.

1. Filtração de gases. 2. Permeabilidade. 3. Gás natural. 4. Porosidade. I. Título.

CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
EDUARDO HIROMITSU TANABE, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS EM 21 DE SETEMBRO DE 2011.

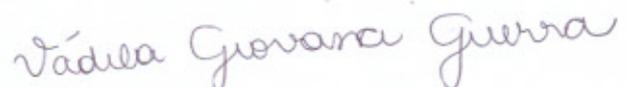
BANCA EXAMINADORA:



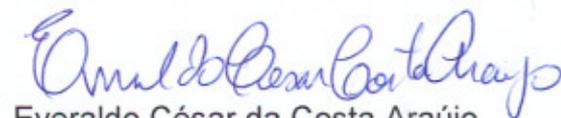
José Renato Coury
Orientador / UFSCar



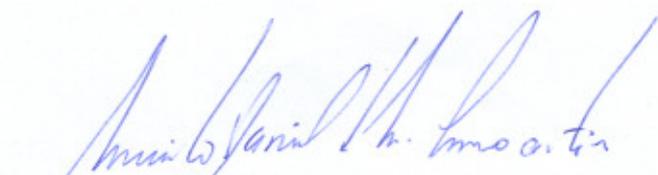
Mônica Lopes Aguiar
Co-orientadora / UFSCar



Vádila Giovana Guerra
UFSCar



Everaldo César da Costa Araújo
UFSCar



Murilo Daniel de Mello Innocentini
UNAERP



Fábio de Oliveira Arouca
UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre estar acompanhando os meus caminhos e iluminando os meus passos.

Aos meus pais, Takashi Tanabe e Tochie Tanabe, por acreditarem e sempre estarem presentes em todos os momentos da minha vida. Quero dedicar também aos meus irmãos e primos que sempre me ajudaram e incentivaram nas minhas decisões.

Ao Prof. Dr. José Renato Coury e a Prof^a. Dra. Mônica Lopes Aguiar pela oportunidade, orientação, sugestões e apoio oferecidos ao longo do desenvolvimento do trabalho. Ao professor Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini pela grande contribuição oferecida no presente trabalho.

Aos demais membros da banca: Prof^a. Dra. Vádila Giovana Guerra, Prof. Dr. Everaldo César da Costa Araújo e Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca pelas sugestões e contribuições para o trabalho.

A uma pessoa muito especial, Fabiana Viapiana, por sempre estar do meu lado incentivando e acompanhando os meus passos.

Aos amigos e amigas do Departamento de Engenharia Química: Letícia, Ivana, Bruna, Renata, Ediane, Aruana, Tiago, Diana, Hugo, Maisa, Priscila, Isabel, Luciano e Liliane, Diogo pela grande amizade construída durante todo este tempo em São Carlos.

Aos velhos amigos Rodrigo, Lucas, Wellington, Robson e Eduardo Baston pela grande amizade construída em São Carlos.

Aos funcionários do da UFSCar: Oscar e Adilson pela disposição e ajuda para a manutenção da unidade experimental e Dorival, pelos desenhos elaborados.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro oferecido.

Ao departamento de Engenharia Química pela infra-estrutura e equipamentos utilizados para o desenvolvimento da Tese de Doutorado.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vii
NOMENCLATURA	viii
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Gás natural.....	5
2.2 Aplicações e vantagens do gás natural.....	7
2.3 Produção e transporte do gás natural.....	9
2.4 Filtração de gases.....	13
2.5 Equipamentos na filtração de gás natural.....	14
2.6 Meios filtrantes.....	16
2.7 Mecanismos de coleta.....	19
2.8 Variáveis na filtração de gases.....	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Material particulado.....	51
3.2 Meios filtrantes.....	53
3.3 Equipamento de filtração.....	55
3.4 Procedimento experimental.....	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
4.1 Permeabilidade do meio filtrante.....	70
4.1.1 Permeabilidade experimental.....	70
4.1.2 Simulação da permeação com gás natural.....	80
4.2 Ensaio de filtração.....	87
4.2.1 Perda de carga no filtro.....	87
4.2.2 Porosidade experimental da torta.....	91
4.2.3 Comparação da porosidade experimental da torta com modelos da literatura.....	97
4.2.4 Resistência específica da torta.....	99

4.2.5 Eficiência coleta experimental.....	101
4.2.6 Comparação da eficiência de coleta experimental com os modelos da literatura.....	104
4.2.7 Proposta de uma correlação para eficiência de coleta.....	114
5. CONCLUSÕES.....	118
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	120
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
APÊNDICE.....	128

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Consumo de gás natural por setor.....	9
Figura 2.2: Vista esquemática de um gasoduto.....	11
Figura 2.3: Pó preto.....	12
Figura 2.4: Filtração de gases.....	14
Figura 2.5: Diferenças entre separadores tipo cesto e cartucho.....	15
Figura 2.6: Ilustração da superfície de um filtro metálico trançado.....	17
Figura 2.7: Ilustração da superfície de um filtro de celulose não trançado.....	17
Figura 2.8: Mecanismos físicos de coleta.....	20
Figura 2.9: Atuação dos mecanismos de coleta e as eficiências correspondentes....	29
Figura 2.10: Geometrias típicas e orientações no fluxo para os elementos filtrantes; (a) disco plano; (b) Fluxo radial para o interior do cilindro vazado; (c) Fluxo radial para o exterior cilindro vazado.....	32
Figura 2.11: Sequência de filtros.....	48
Figura 3.1: Imagem da superfície das partículas de rocha fosfática.....	52
Figura 3.2: Distribuição granulométrica das partículas de rocha fosfática.....	52
Figura 3.3: Imagens das superfícies dos meios filtrantes a) poliéster, b) polipropileno, c) celulose e d) metálico, geradas no MEV, com aumento de 50x...	55
Figura 3.4: Equipamento de filtração a alta pressão.....	56
Figura 3.5: Ilustração do sistema de limpeza do ar comprimido.....	57
Figura 3.6: Ilustração do alimentador de partículas do tipo rosca.....	58
Figura 3.7: Ilustração do sistema de filtração.....	59
Figura 3.8: Ilustração do sistema de aquisição de dados.....	60
Figura 3.9: Ilustração do contador de partículas.....	61
Figura 3.10: Imagem da torta-tecido gerada no MEV, ampliação de 200x.....	68
Figura 3.11: Imagens da torta de filtração: a) Gerada no MEV, ampliação de 1000x e b) Binarizada no programa Image Pro Plus 7.0.....	69
Figura 4.1: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro	

de poliéster.....	72
Figura 4.2: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de polipropileno.....	72
Figura 4.3: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de celulose.....	73
Figura 4.4: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro metálico.....	73
Figura 4.5: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de poliéster.....	75
Figura 4.6: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de polipropileno.....	76
Figura 4.7: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de celulose.....	76
Figura 4.8: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de metálico.....	77
Figura 4.9: Permeabilidade Darciana (k_1) em função da pressão do sistema.....	78
Figura 4.10: Permeabilidade não Darciana (k_2) em função da pressão do sistema..	78
Figura 4.11: Comparação dos valores experimentais e preditos do coeficiente de permeabilidade Darciana (k_1).....	80
Figura 4.12: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de poliéster.....	81
Figura 4.13: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de polipropileno.....	82
Figura 4.14: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de celulose.....	82
Figura 4.15: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de metálico.....	83
Figura 4.16: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de poliéster.....	85
Figura 4.17: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de polipropileno.....	85
Figura 4.18: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de celulose.....	86
Figura 4.19: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás	

natural no filtro de metálico.....	86
Figura 4.20: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro de poliéster.....	88
Figura 4.21: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro de polipropileno.....	88
Figura 4.22: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro de celulose.....	89
Figura 4.23: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro metálico.....	89
Figura 4.24: Comparativo das curvas de filtração dos meios filtrantes na pressão do sistema de 693 kPa.....	90
Figura 4.25: Imagens da torta de filtração no filtro de poliéster para as pressões: a) P=193 kPa, b) P=393 kPa e c) P=693 kPa.....	92
Figura 4.26: Imagens da torta de filtração no filtro de polipropileno para as pressões: a) P=193 kPa, b) P=393 kPa e c) P=693 kPa.....	93
Figura 4.27: Imagens da torta de filtração no filtro de celulose para as pressões: a) P=193 kPa, b) P=393k Pa e c) P=693 kPa.....	94
Figura 4.28: Imagens da torta de filtração no filtro metálico para as pressões: a) P=193 kPa, b) P=393k Pa e c) P=693 kPa.....	95
Figura 4.29: Porosidade experimental da torta com a variação da pressão do sistema nos meios filtrantes.....	96
Figura 4.30: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de poliéster.....	97
Figura 4.31: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de polipropileno.....	98
Figura 4.32: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de celulose.....	98
Figura 4.33: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de metálico.....	99
Figura 4.34: Resistência específica da torta de filtração.....	100
Figura 4.35: Eficiência fracionária do filtro de poliéster.....	101
Figura 4.36: Eficiência fracionária do filtro de polipropileno.....	102
Figura 4.37: Eficiência fracionária do filtro de celulose.....	102

Figura 4.38: Eficiência fracionária do filtro metálico.....	103
Figura 4.39: Comparativo da eficiência fracionária dos filtros na pressão do sistema de 693 kPa.....	104
Figura 4.40: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de poliéster.....	105
Figura 4.41: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de polipropileno.....	106
Figura 4.42: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de celulose.....	106
Figura 4.43: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de metálico.....	107
Figura 4.44: Imagem da seção transversal do filtro de poliéster.....	109
Figura 4.45: Imagem da seção transversal do filtro de polipropileno.....	109
Figura 4.46: Imagem da seção transversal do filtro de celulose.....	109
Figura 4.47: Imagem da seção transversal do filtro de metálico.....	109
Figura 4.48: Distribuição das fibras dos filtros.....	111
Figura 4.49: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de poliéster.....	112
Figura 4.50: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de polipropileno.....	112
Figura 4.51: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de celulose.....	113
Figura 4.52: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de metálico.....	113
Figura 4.53: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de poliéster.....	115
Figura 4.54: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de polipropileno.....	115
Figura 4.55: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de celulose.....	116
Figura 4.56: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro metálico.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição do Gás Natural.....	6
Tabela 3.1: Caracterização dos materiais particulados.....	52
Tabela 3.2: Caracterização dos meios filtrantes.....	54
Tabela 3.3: Composição molar do gás natural usado na simulação.....	64
Tabela 3.4: Coeficientes utilizados na Equação (3.4).....	65
Tabela 3.5: Coeficientes utilizados na Equação (3.7).....	66
Tabela 4.1: Propriedades do gás natural a 20°C para diferentes pressões.....	81
Tabela 4.2: Distribuição das fibras do filtro de Poliéster.....	110
Tabela 4.3: Distribuição das fibras do filtro de Polipropileno.....	110
Tabela 4.4: Distribuição das fibras do filtro de Celulose.....	110
Tabela 4.5: Distribuição das fibras do filtro Metálico.....	111
Tabela 4.6: Valores de parâmetros de ajuste da Equação (4.3).....	117

NOMENCLATURA

A - área superficial da torta	[L ²]
A_e - área externa do cilindro vazado	[L ²]
A_f - área da superfície exposta ao fluxo	[L ²]
A_p - área projetada	[L ²]
c - fator de correção de Cunningham	[-]
C - concentração de partículas	[M L ⁻³]
C_i - concentração de partículas na entrada do filtro	[M L ⁻³]
C_o - concentração de partículas na saída do filtro	[M L ⁻³]
C_s - fator de escorregamento de Cunningham	[-]
D - coeficiente de difusividade	[L ² t ⁻¹]
D_e - diâmetro interno do meio filtrante cilíndrico	[L]
d_f - diâmetro das fibras	[L]
D_i - diâmetro interno do meio filtrante cilíndrico	[L]
d_p - diâmetro da partícula	[L]
F_o - número de Forchheimer	[-]
g - aceleração da gravidade	[L t ⁻²]
H - altura do meio filtrante cilíndrico	[L]
k - fator de forma	[-]
k_1 - coeficiente de permeabilidade Darciana	[L ²]
k_2 - coeficiente de permeabilidade não Darciana	[L]
K_B - constante de Boltzman	[M L ² t ⁻² T ⁻¹]
k_c - resistência específica da torta	[t ⁻¹]
k_m - resistência específica do meio filtrante	[M.L ⁻² .t ⁻¹]
Kn - número de Knudsen	[-]
Kn_f - número de Knudsen da fibra	[-]
Ku - coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara	[-]
L - espessura do meio filtrante	[L]
L_c - espessura da torta	[L]
L_f - comprimento da fibra por unidade de volume	[L ⁻²]
M - massa de torta depositada	[M]
MM_a - massa molar do gás	[nM ⁻¹]

n_i - número de fibras	[-]
N_C - número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo	[-]
N_P - número de partículas depositadas por unidade de tempo	[-]
P - pressão absoluta	[M L ⁻¹ t ⁻²]
P_{Ci} - pressão crítica	[M L ⁻¹ t ⁻²]
P_e - número de Peclet	[-]
P_{er} - perímetro da partícula	[L]
P_i - pressão absoluta na entrada do filtro	[M L ⁻¹ t ⁻²]
P_n - penetração	[-]
P_o - pressão absoluta na saída do filtro	[M L ⁻¹ t ⁻²]
P_{Pr} - pressão pseudo reduzida	[M L ⁻¹ t ⁻²]
P_R - pressão de referência	[M L ⁻¹ t ⁻²]
Q - vazão mássica de pó	[M.t ⁻¹]
Q_v - vazão volumétrica do gás	[L ³ t ⁻¹]
R - parâmetro de interceptação direta	[-]
R' - constante universal dos gases	[M L ² t ⁻² n T]
R_{ef} - número de Reynolds da fibra	[-]
St - número de Stokes	[-]
T - temperatura absoluta	[T]
T_{Ci} - temperatura crítica	[T]
T_{Pr} - temperatura pseudo reduzida	[T]
T_R - temperatura de referência	[T]
t - tempo	[t]
U_o - velocidade do gás	[L t ⁻¹]
v - velocidade intersticial do gás	[L t ⁻¹]
v_s - velocidade superficial do gás	[L t ⁻¹]
v_s - velocidade superficial do gás de referência	[L t ⁻¹]
v_t - velocidade terminal da partícula	[L t ⁻¹]
W - massa de pó depositada por unidade de área	[M.L ⁻²]
w - vazão mássica do gás	[M t ⁻¹]
x_i - fração das fibras do filtro	[-]
y_i - fração molar	[-]

Z_o - fator de compressibilidade do gás natural	[-]
ΔP - queda de pressão	[M L ⁻¹ t ⁻²]
ΔP_c - queda de pressão da torta	[M L ⁻¹ t ⁻²]
ΔP_m - queda de pressão do meio filtrante	[M L ⁻¹ t ⁻²]
ΔP_t - queda de pressão total	[M L ⁻¹ t ⁻²]
λ - caminho livre médio das moléculas do gás	[L]
μ - viscosidade do gás	[M L ⁻¹ t ⁻¹]
μ_o - viscosidade do gás natural	[M L ⁻¹ t ⁻¹]
ε - porosidade volumétrica	[-]
ε_i - porosidade do leito poroso	[-]
ε_s - porosidade superficial	[-]
α - densidade de empacotamento	[-]
β - volume ocupado pelas fibras	[L ³]
η_d - eficiência de coleta difusional	[-]
η_e - eficiência de coleta eletroforética	[-]
η_g - eficiência de coleta gravitacional	[-]
η_i - eficiência de coleta inercial	[-]
η_{id} - eficiência de coleta por interceptação direta	[-]
η_t - soma das eficiências de cada mecanismo de coleta	[-]
ρ - densidade do fluido	[M L ⁻³]
ρ_f - densidade das fibras	[M L ⁻³]
ρ_g - densidade do gás	[M L ⁻³]
ρ_o - densidade do gás natural	[M L ⁻³]
ρ_p - densidade da partícula	[M L ⁻³]
σ_g - desvio padrão geométrico das partículas	[-]
ϕ - esfericidade da partícula	[-]

RESUMO

A presença de resíduos em gasodutos no transporte do gás natural pode acarretar para as companhias de gás inúmeros prejuízos, dentre os quais se destacam: obstrução de equipamentos de medidas, diminuição da qualidade do produto e redução no tempo de vida útil de equipamentos. Uma maneira bastante eficiente e barata para remoção das partículas é a utilização da filtração de gases. Apesar da grande aplicabilidade dos filtros, ainda são poucos os estudos de filtração de gás natural, devido às suas condições operacionais, porque trabalham a elevadas pressões. Desta forma, pesquisas nessa área são extremamente importantes para se obter maiores informações a respeito desse assunto. Neste contexto, o presente trabalho teve por finalidade analisar o comportamento de diferentes meios filtrantes na filtração de gases as altas pressões. O material particulado utilizado foi a rocha fosfática e os meios filtrantes foram o poliéster, o polipropileno, a celulose e o metálico. Para os ensaios de permeabilidade, variou-se a pressão absoluta do sistema de 93 kPa a 693 kPa e as vazões volumétricas de 14 l/min a 74 l/min, sendo o fluido utilizado o ar comprimido. Nos ensaios de filtração avaliaram-se as pressões do sistema de 193, 393 e 693 kPa, mantendo-se constante a velocidade superficial do gás em 0,05 m/s. Os resultados mostraram que as constantes de permeabilidades (k_1 e k_2) não apresentaram variações significativas com o aumento da pressão do sistema, no qual k_1 e k_2 tenderam a um valor constante. Considerando-se que as constantes de permeabilidade não apresentaram grandes variações com o aumento da pressão, foram realizadas simulações para determinar a perda de carga utilizando o gás natural como fluido. Os resultados indicaram que, para uma mesma perda de carga no elemento filtrante, o aumento da pressão do sistema resultou em maiores capacidades de filtração. Nos ensaios de filtração, observou-se que, para uma mesma massa de pó coletada, a maior pressão absoluta aplicada no sistema (693 kPa) proporcionou a menor perda de carga no filtro. Uma análise na porosidade das tortas mostrou que o aumento da pressão resultou em tortas mais porosas e menos resistentes ao escoamento do gás. Verificou-se também que o aumento da pressão do sistema proporcionou um aumento na eficiência fracionária dos filtros para as partículas menores que 5 μm .

ABSTRACT

The presence of residue in the transport of natural gas in pipelines may result in numerous losses for the gas companies, such as obstruction of measuring equipment, decrease in product quality, and reduction in the lifetime of equipment. A very efficient and inexpensive way for removal of particles is the use of gas filtration. Despite the wide applicability of filters, there are very few studies on natural gas filtration, due to their operating conditions, because they work at high pressures. Thus, research in this area is extremely important to obtain more information about this subject. Therefore, this study aimed to examine the behavior of different filter media used in gas filtration at high pressures. The particulate matter used was the phosphate concentrate and the filter media were polyester, polypropylene, cellulose and metal. The absolute pressure of the system varied from 93 kPa to 693 kPa and the volumetric flow from 14 l/min to 74 l/min in the permeability trials and the fluid used was compressed air. The system pressures of 193, 393 and 693 kPa were used in the filtration trials and the superficial gas velocity was kept constant at 0.05 m/s. The results showed that the permeability constants, k_1 and k_2 , did not present significant variations with the increase in the system pressure, that is, the values tended to a constant value. Simulations to determine pressure drop using natural gas as fluid were performed considering that the permeability constants did not present large variations. The results indicated that the increase in system pressure resulted in greater filtering capacities for a given pressure drop. It was observed that the highest absolute pressure applied to the system (693 kPa) provided the lowest pressure drop at the filter for the same powder mass collected in the filtration trials. An analysis of the dust cakes porosity revealed that the increase in pressure resulted in more porous cakes which were less resistant to gas flow. Also, it was verified that the increase in the system pressure provided an increase in the fractional efficiency of the filters for particles smaller than 5 μm .

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução industrial, no século XVIII, a expansão demográfica e o aumento da poluição atmosférica vêm buscando fontes alternativas de energia que sejam menos poluentes ao meio ambiente (CAVALCANTI, 2005). Por isso, o mercado de gás natural tem apresentado um crescimento substantivo nos últimos anos.

No Brasil a utilização do gás natural começou modestamente por volta de 1940, com as descobertas de óleo e gás na Bahia, atendendo a indústrias localizadas no Recôncavo Baiano. Em 1999, com a entrada em operação do Gasoduto Brasil-Bolívia, com capacidade de transportar 30 milhões de metros cúbicos de gás por dia, houve um aumento expressivo na oferta nacional de gás natural. Nos primeiros anos de operação do gasoduto, a elevada oferta do produto e os baixos preços praticados, favoreceram uma explosão no consumo tendo o consumo do gás superado os 10% de participação na matriz energética nacional (MATHIAS e SZKLO, 2007).

A produção média de gás natural em 2010 no Brasil atingiu 62,84 milhões de m³/dia. A oferta doméstica foi de 28,04 milhões de m³/dia, descontados o gás liquefeito e o utilizado no processo produtivo, a injeção e as perdas. Pelo gasoduto Bolívia-Brasil foi ofertado ao mercado brasileiro uma média de 26,91 milhões de m³/dia, descontado o gás de uso no sistema. O volume total importado de Gás Natural Liquefeito foi de 7,64 milhões de m³/dia. A oferta total de gás natural ao mercado brasileiro foi de 61,3 milhões de m³/dia (MME, 2011).

A principal vantagem da utilização do gás natural acontece principalmente em razão de seu menor impacto ambiental em comparação com as demais fontes fósseis. A combustão de gases combustíveis adequadamente processados e em equipamentos corretos é praticamente isenta de poluentes como óxidos de enxofre, partículas sólidas e baixa emissão de CO₂. A queima do gás natural também apresenta outras vantagens. Por exemplo, o gás possibilita uma combustão com elevado rendimento térmico, redução nas manutenções de

equipamentos, bem como controle e regulação simples da chama. Assim, podem-se obter reduções na intensidade de consumo de energia na indústria, no comércio ou em residências. Além disso, ao permitir que a chama e/ou os gases de combustão entrem em contato direto com os produtos produzidos, a utilização do gás em várias indústrias contribui para o aumento da qualidade e da competitividade desses produtos (SCHWOB et al., 2009).

No Brasil, toda a infra-estrutura empregada para o transporte do gás natural é feita a partir de uma malha de gasodutos composto basicamente por sistemas de compressão, redutoras de pressão, sistemas de medição, de supervisão e controle, com a finalidade de colocar o gás natural disponível às Companhias Distribuidoras em todos os pontos de entrega localizados ao longo da diretriz do Gasoduto (BURMAN, 2004).

Uma das principais linhas de transmissão de gás natural no Brasil é o Gasoduto Bolívia-Brasil, com extensão total de 3150 km, sendo 557 km na Bolívia e 2593 km no território Brasileiro (TBG, 2010).

Antes de ser transportado em gasodutos esse gás passa pelas unidades de processamento de gás natural (UPGNs), onde é submetido a operações de desidratação, separação, de compressão e de remoção de gases ácidos e contaminantes como O_2 , H_2S e CO_2 . Entretanto, mesmo após o tratamento do gás, a presença de umidade associada às variações de temperatura, decorrentes do processo ou a queda de temperatura externa, favorecem a condensação de água no interior da tubulação, iniciando o processo corrosivo. Mesmo os resíduos contaminantes como H_2S e CO_2 podem se dissolver na água favorecendo o início do processo corrosivo localizado (SILVA et al., 2001).

Essa taxa de corrosão é muito baixa, pois o gás é considerado seco. Porém, devido às grandes extensões de duto, a área superficial exposta ao gás transportado é também muito grande e, por isso, uma quantidade considerável de produtos sólidos desprendidos da corrosão é transportada ao longo da extensão do duto (SILVA et al., 2002 a).

Estes sólidos encontrados nos sistemas de transmissão e distribuição são conhecidos como Pó Preto (“Black Powder”). A presença destes resíduos pode proporcionar perdas de eficiência em compressores, obstrução e erosão nos instrumentos de medidas e válvulas, redução na qualidade do gás distribuído, elevação nos custos de limpeza e manutenção de equipamentos para remoção de sólidos entre outros (AZADI et al., 2011).

Uma alternativa para a remoção destes contaminantes é a filtração dos gases. Esta operação tem-se tornado cada vez mais atrativa para o mercado do gás natural, devido ao custo relativamente barato e também pela alta eficiência de coleta de partículas para uma ampla faixa granulométrica (podendo alcançar até 99 % para partículas 0,5 a 3 μm) (TSOCHATZIDIS & MAROULIS, 2007).

Seu processo ocorre pela passagem do aerossol através do meio filtrante, de tal forma que as partículas vão se depositando sobre a superfície do filtro. A coleta ocorre devido ao contato físico entre as partículas e o elemento coletor, sendo necessária a retenção da partícula no coletor, ou seja, a aderência (DONOVAN, 1985)

Os principais tipos de equipamentos utilizados na filtração do gás natural são do tipo cesto e do tipo cartucho. Estes equipamentos utilizam como meio filtrante as membranas de celulose ou tela metálica e apresentam um alto grau de filtração para uma ampla faixa de tamanho de partículas. As membranas de celulose plissadas possuem uma grande área filtrante, permitindo com isso, uma vida muito mais longa dos meios filtrantes, maiores capacidade de retenção de sólidos e conseqüentemente propiciam uma grande economia ao seu usuário. As telas metálicas são produzidas em aço inox e podem ser recuperadas e reutilizadas após limpeza, além de permitirem uma operação com maior perda de carga e conseqüente redução no ciclo de manutenção (GASCAT, 2010).

As condições operacionais típicas aplicadas em um sistema de distribuição de gás natural podem variar com pressões desde 1500 kPa até 30 kPa e as vazões de 300.000 a 1.500.000 m³/dia (ANP, 2007).

Uma escolha adequada destes meios filtrantes pode reduzir os custos de manutenção, troca de equipamentos e garantir um produto de alta qualidade para o consumidor final. Estes meios filtrantes devem suportar elevadas pressões, apresentar uma alta eficiência e uma baixa perda de carga.

Nos dias de hoje, grande parte do conhecimento empírico sobre a filtração de gás natural adquirido no campo não é suficiente e nem confiável para uma análise científica do efeito da pressão sobre os meios filtrantes. Entretanto, com o aumento do consumo do Gás Natural e a grande expansão nas linhas de gasoduto no Brasil, torna-se necessário um melhor conhecimento do desempenho da permeação e da filtração de gases a altas pressões.

Diante desta situação, o objetivo deste trabalho foi investigar o comportamento dos meios filtrantes aplicados às condições de alta pressão, com o intuito de avaliar os parâmetros relevantes nas operações de filtração, como a permeabilidade do meio filtrante, a perda de carga, a porosidade das tortas de filtração e a eficiência de coleta de partículas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordada uma visão geral em relação ao gás natural, apresentando suas principais características, aplicações, vantagens e o transporte. Posteriormente, será apresentado o mecanismo de separação por meio da filtração, com as principais vantagens, tipos de meios filtrantes e variáveis de projeto presentes neste estudo.

2.1 *Gás Natural*

O gás natural é definido como uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, em sua grande maioria metano (CH_4) e etano (C_2H_6), com pequenas quantidades de outros gases, como propano, nitrogênio, dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio e vapor de água. Na natureza, ele é encontrado em acumulações em rochas porosas no subsolo (marinho ou terrestre) em geral acompanhado de petróleo (JANKAUSKIS, 1999).

A composição comercial do gás natural é variada e depende da composição do gás natural bruto, do mercado atendido e do uso final. Apesar desta variabilidade da composição, os parâmetros fundamentais que determinam a especificação comercial do gás natural são o teor de enxofre total, de gás sulfídrico, de gás carbônico, de gases inertes, o ponto de orvalho da água, o ponto de orvalho dos hidrocarbonetos e o poder calorífico. A Tabela 2.1 apresenta uma composição típica de gás natural (GÁSBRAZILIANO, 2011).

Além disso, o gás natural deve estar sempre isento de poeira, água condensada, gomas, elementos formadores de goma, glicóis, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos que possam interferir na operação dos sistemas de transporte e distribuição e à utilização pelos consumidores (ANP, 2002).

Tabela 2.1: Composição do Gás Natural.

Composição média em % vol.- Gás Natural da Bolívia		
Metano	CH ₄	91,8
Etano	C ₂ H ₆	5,58
Propano	C ₃ H ₈	0,97
Iso-Butano	C ₄ H ₁₀	0,03
N-Butano	C ₄ H ₁₀	0,02
Pentano	C ₅ H ₁₂	0,01
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,80
Nitrogênio	N ₂	1,42

Fonte: GASBRAZILIANO, 2011.

O gás natural comercializado no país precisa atender as especificações da Agência Nacional do Petróleo- ANP (2002), que estabelece, dentre outras coisas:

- poder calorífico superior variando entre 8.360 a 10.032 kcal/m³ a uma temperatura de 20°C e pressão de 1 atm;
- metano com composição mínima de 86% do volume;
- etano com composição máxima de 10% do volume;
- propano com composição máxima de 3% do volume;
- butano e mais pesados com composição máxima de 1,5% do volume;
- oxigênio com composição máxima de 0,5% do volume;
- inertes (N₂ + CO₂) com composição máxima de 5% do volume;
- nitrogênio com composição máxima de 2% do volume;
- enxofre total com composição máxima de 70 mg/m³ ;
- gás sulfídrico (H₂S) com composição máxima de 15 mg/m³.

O manuseio do gás natural requer alguns cuidados, pois este composto é inodoro, incolor, inflamável e asfixiante quando aspirado em altas concentrações. Por isso, para facilitar a sua identificação em casos de vazamento, compostos à base de enxofre são adicionados ao gás, em concentrações suficientes para lhe dar um odor característico. Este processo é conhecido como odorização do gás. (SANTOS, 2002).

2.2 Aplicações e vantagens do gás natural

O gás natural é uma fonte de energia segura, versátil e econômica. Sua queima produz baixa emissão de poluentes, graças a uma combustão mais limpa e eficiente (SCHWOB et al., 2009). A utilização de gás natural vem proporcionando benefícios significativos para o meio ambiente, além de diminuir o custo operacional com manutenção de equipamentos, transporte e armazenamento de combustível. As principais aplicações estão nos setores industriais, veiculares, domiciliares e nas termelétricas.

Na indústria é utilizado como combustível, no qual proporciona uma combustão limpa, isenta de poluentes, ideal para processos que exigem a queima em contato direto com o produto final como, por exemplo, a indústria de cerâmica e a fabricação de vidro e cimento. O gás natural também pode ser utilizado como redutor siderúrgico na fabricação de aço e, de formas variadas, como matéria-prima: na indústria petroquímica, principalmente para a produção de metanol, e na indústria de fertilizantes, para a produção de amônia e uréia (GASIPA, 2011).

No uso em automóveis, ônibus e caminhões, o gás natural recebe o nome de gás veicular (GNV), oferecendo vantagem no custo por quilômetro rodado. Como é seco, o gás natural não provoca resíduos de carbono nas partes internas do motor, o que, de um lado,

aumenta a vida útil do motor e o intervalo de troca de óleo e, do outro, reduz significativamente os custos de manutenção. O uso de GNV também tem importante papel na redução dos níveis de poluição atmosférica, uma vez que a sua combustão com excesso de ar tende a ser completa, reduzindo os resíduos de dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O) (ABGNV INSTITUCIONAL, 2004.)

No ambiente urbano, o uso adequado deste combustível, se comparado com os combustíveis tradicionais, podem reduzir as emissões de monóxido de carbono (CO) em 76%, de óxidos de nitrogênio (NO_x) em 84%, e de hidrocarbonetos pesados (C_nH_m) em 88%, praticamente eliminando as emissões de benzeno e formaldeídos, que são cancerígenos.

Ele pode ser utilizado nas cidades, através de redes de distribuição, para consumo em residências, bares, hotéis e restaurantes, substituindo o gás liquefeito de petróleo. Seu uso residencial e comercial, nos países de clima frio, é predominantemente voltado para aquecimento de ambientes. Já no Brasil, esse uso é quase exclusivo para cozimento de alimentos e aquecimento de água (GASIPA, 2011).

Nas termelétricas, o gás natural é utilizado em turbinas que, associadas com caldeiras recuperadoras de calor, pode apresentar dupla função: geração de energia elétrica e produção de vapor. Esse processo tem o nome de co-geração e, por sua segurança operacional e economia, vem sendo utilizado por diversas indústrias no País e no mundo (JANKAUSKIS, 1999).

A Figura 2.1 ilustra o consumo do interno do gás no Brasil dos principais segmentos no ano de 2010. Observa-se que grande parte do gás natural é empregada no setor industrial, com aproximadamente 67%.

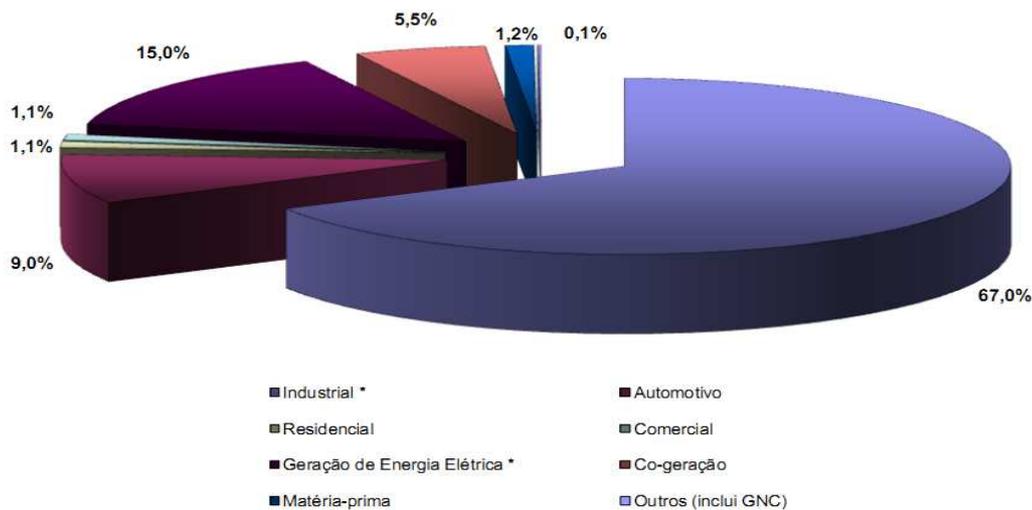


Figura 2.1: Consumo de gás natural por setor (MME, 2011).

2.3 Produção e transporte do gás natural

A produção é semelhante a do petróleo. O gás natural precisa ser tratado antes de sua comercialização. Assim que o gás natural é retirado de uma jazida, se o gás estiver contaminado com resíduos de enxofre, deverá ser enviado para uma unidade de dessulfurização. Após essa etapa, o gás é transferido para as Unidades de Processamento do Gás Natural (UPGN) e parte do gás natural pode ser aproveitada para estimular a recuperação do petróleo através dos métodos de reinjeção de gás (GASENERGIA, 2006)

Nas UPGN's, o gás natural passa por algumas etapas até estar pronto para comercialização. Inicialmente, é desidratado para retirar o vapor d'água existente, e em seguida, sofre um processo de absorção com refrigeração ou turbo expansão, com a finalidade de separar as frações pesadas, atendendo às exigências do mercado e do meio ambiente. O resultado final é a produção de gás natural residual (metano e etano), gás natural liquefeito (propano e butano) e gasolina natural transportada para as refinarias para futuro processamento (SANTOS, 2002).

No estado gasoso, o transporte do gás natural é feito por meio de dutos ou, em casos muito específicos, em cilindros de alta pressão como gás natural comprimido (GASENERGIA, 2006).

Rodrigues (2001) definiu o transporte dutoviário como o transporte de granéis, por gravidade ou pressão mecânica, através de dutos adequadamente projetados à finalidade a que se destinam. A dutovia utilizada para o transporte de gás natural também é conhecida como gasoduto.

O gasoduto é um conjunto de tubos de aço especial de grande resistência e durabilidade, totalmente soldado para evitar vazamentos e enterrados no chão a uma profundidade média de 1,5 m. Depois de enterrados, são colocadas placas de concreto de 50 centímetros acima dos tubos para protegê-los contra acidentes no caso de escavação do local. Além disso, é colocada, sobre as placas de proteção, uma faixa laranja indicando o gasoduto enterrado. Isto torna o transporte bastante seguro, pois nem sempre as reservas de gás natural estão perto dos centros consumidores, fazendo-se necessário a existência dos gasodutos (RICCO, 2009).

Em muitos casos estes dutos recebem um revestimento interno com pintura de tinta epóxi, com cerca de 60 μm de espessura, também é utilizada com a finalidade de proteção contra corrosão interna e para reduzir o atrito. Com a redução da rugosidade, a eficiência de transporte do gás representa um aumento em torno de 10%, comparando-se com gasodutos não revestidos internamente (BURMAN, 2004).

A operação do gasoduto é feita à distância, monitorada por instrumentos ao longo da tubulação, seja com a utilização de comunicação por satélites, seja com fibras óticas na faixa de domínio do gasoduto. Esta instrumentação acompanha a evolução da pressão na tubulação, com o objetivo de identificar eventual perda de gás para a atmosfera e também mede o fluxo

que passa ao longo dela, inclusive as saídas nos pontos de entrega das estações distribuidoras, também conhecidas como “city-gates” (BURMAN, 2004).

Nestas estações, normalmente não existem operadores para a medição e controle de pressão. Através do sistema de comunicação à distância, tudo é controlado remotamente da estação central de acompanhamento. No caso de um acidente, as válvulas automáticas bloqueiam o trecho afetado. Mesmo assim, frequentemente são feitas inspeções terrestres e aéreas ao longo dos dutos, por pessoal especializado, para constatação de qualquer eventual ação de terceiros que possa colocar em risco a segurança e a integridade física das instalações (BURMAN, 2004).

Um esquema de um gasoduto está apresentado na Figura 2.2, sendo composto por tubulação, estações de compressão, regulador de pressão com medidor de vazão, válvula de bloqueio, estação de supervisão e controle, proteção catódica (método para combate a corrosão) e revestimento externo e interno (BURMAN, 2004).

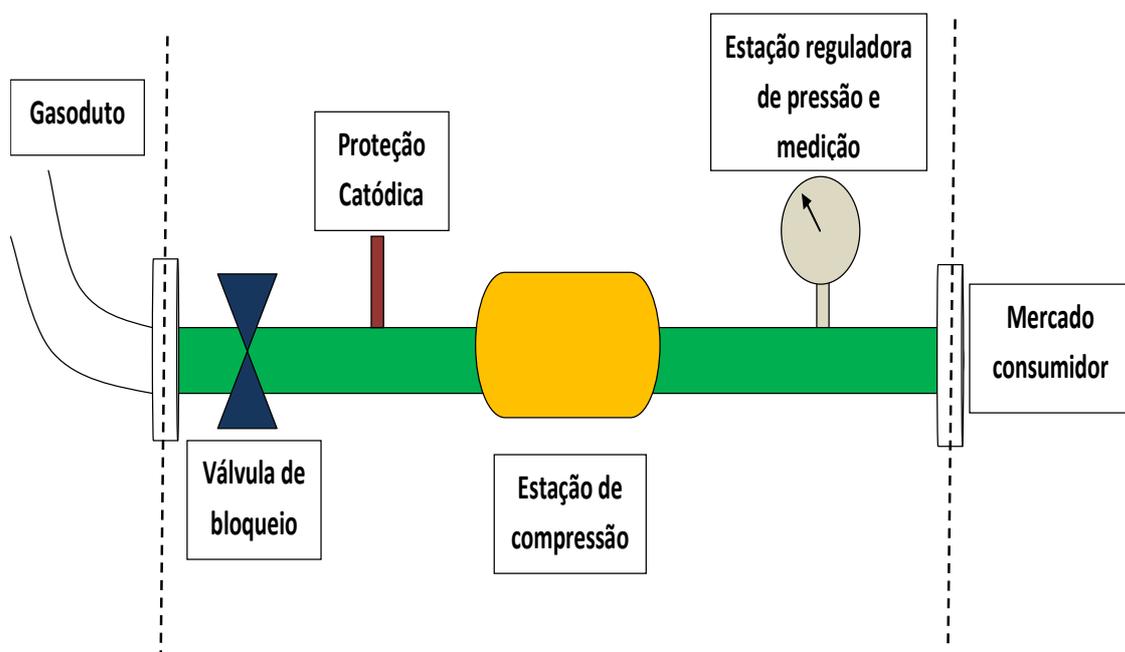


Figura 2.2: Vista esquemática de um gasoduto.

Uma preocupação importante relacionada com o fluxo de gás natural ao longo do gasoduto é a formação de partículas em suspensão, conhecido como pó preto. Este resíduo, normalmente é resultado das reações químicas e microbianas sobre a superfície do tubo interno, devido à presença de umidade e contaminantes ácidos tais como CO_2 e H_2S no gás natural (PALL, 2009).

Sob condições seca, o pó preto pode assumir a forma de um pó muito fino ou sedimento sólido, enquanto que sob condições úmidas, normalmente aparece uma substância semelhante a piche. A composição química inclui diversas formas de sulfeto de ferro e óxido de ferro, embora, quartzo, ferro, carbonato de cálcio, hidrocarbonetos líquidos e outras impurezas também tenham sido relatadas (PALL, 2009). Uma ilustração do material particulado está apresentada na Figura 2.3.

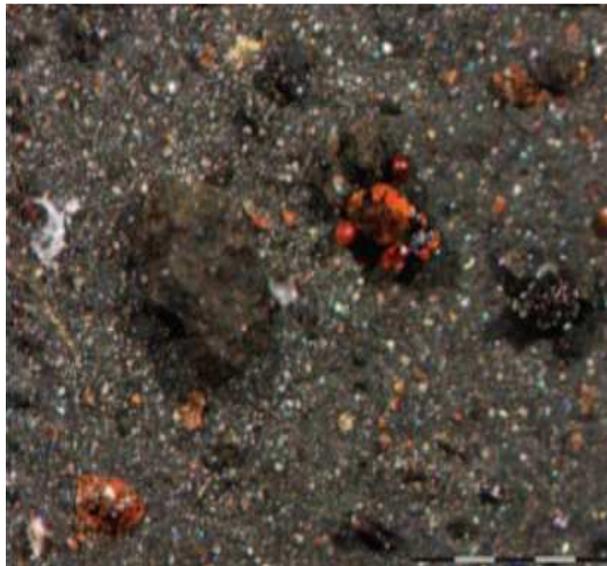


Figura 2.3: Pó preto (PALL, 2009).

A presença de pó preto tem implicações econômicas negativas em redes de gasodutos de gás natural, uma vez que gera desgaste e redução de eficiência em compressores e pode proporcionar entupimento de válvulas e instrumentação. Quando aderidos à superfície da

tubulação, o pó preto também aumenta a rugosidade da tubulação e a fricção com o gás, aumentando a potência necessária em estações de compressão para manter o gás fluindo adequadamente aos destinos. Estima-se que o equivalente a 3 a 5% do gás transportado é consumido pelos compressores, a fim de compensar a perda de pressão do gás durante o transporte (PALL, 2009).

Medidas preventivas podem ser adotadas para reduzir o processo corrosivo, como a injeção de inibidores e também a retenção e remoção mecânica do pó preto com instalações de filtros e ciclones (SILVA et al., 2002b).

2.4 Filtração de gases

A filtração de gases é uma importante operação utilizada na separação gás-sólido, pela passagem do fluido através de um meio poroso permeável (DICKENSON, 1994). Primeiramente, as partículas que entram em contato com o meio filtrante vão sendo capturadas no interior do meio filtrante, denominada de filtração interna. Após um intervalo de tempo, é formada uma camada de partículas na superfície do filtro, conhecida como torta de filtração, que passa ser a responsável pela captura das partículas. A este tipo de filtração denomina-se filtração superficial (DULLIEN, 1989). Uma ilustração da filtração de gases está apresentada na Figura 2.4.

Nas operações de filtração, vários fatores devem ser avaliados de forma a não interferirem nos mecanismos de coleta e de remoção da torta, dentre as quais se destacam: a característica do meio filtrante e do material particulado, a velocidade de filtração, a densidade e a viscosidade do gás, a velocidade de limpeza, a espessura da torta formada, a temperatura, a umidade e a pressão do sistema. Estes fatores influenciam diretamente na eficiência e na viabilidade econômica deste método de limpeza de gases.

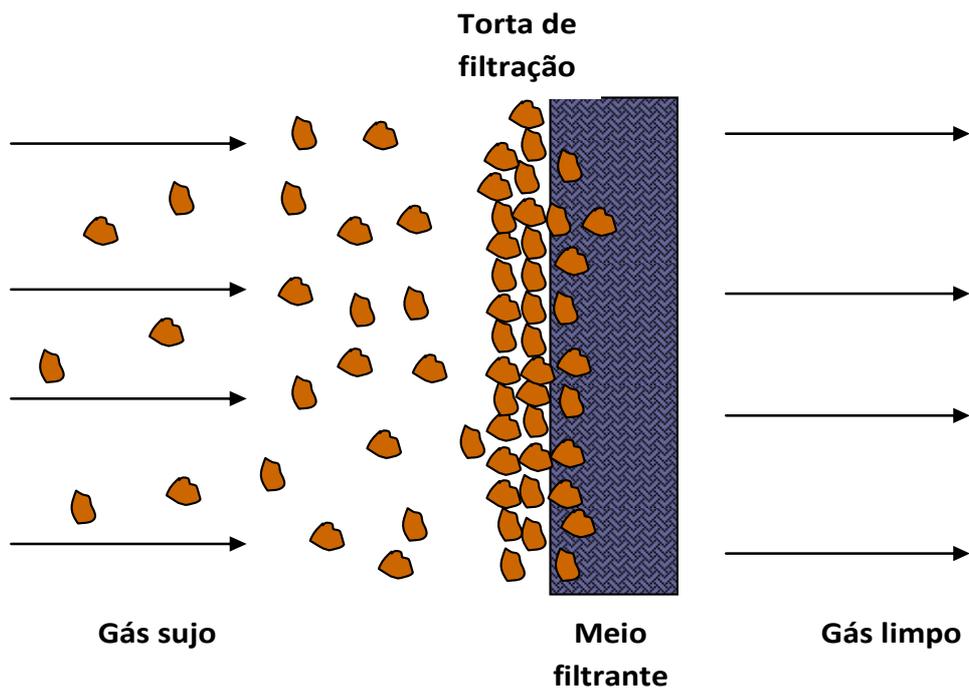


Figura 2.4: Filtração de gases.

Para descrever o desempenho de qualquer tipo de coletor de pó são utilizados dois parâmetros de projeto: a eficiência de coleta e a perda de carga. Normalmente, é esperada uma eficiência de coleta total igual ou superior a 99%, além de baixas quedas de pressão durante a operação, sendo que tais parâmetros são funções da velocidade superficial do gás (DULLIEN, 1989).

2.5 Equipamentos na filtração de gás natural

As companhias distribuidoras de gás natural no Brasil geralmente utilizam dois tipos de vasos de pressão para a remoção do material particulado no gás, o separador do tipo cesto e separador do tipo cartucho. As diferenças básicas de operações entre eles estão apresentadas na Figura 2.5.

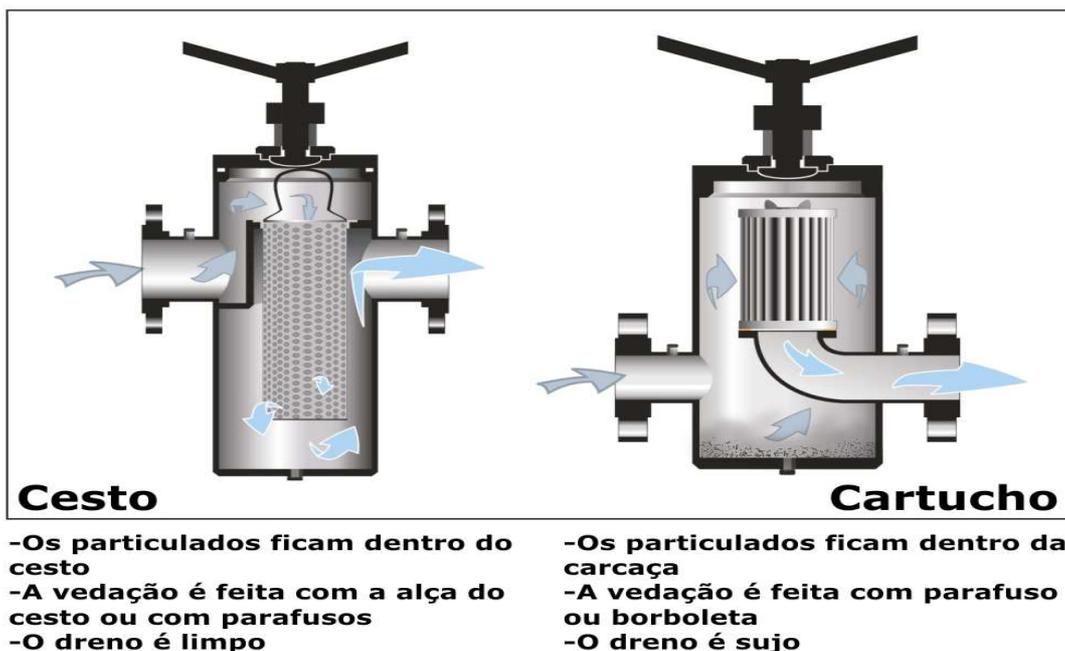


Figura 2.5: Diferenças entre separadores tipo cesto e cartucho (RICCO, 2009).

Os separadores do tipo cesto são projetados para a filtração de sólidos presentes no fluxo do gás, utilizando-se de cesto de malha metálica, cujo projeto e construção oferecem a máxima área filtrante e uma grande capacidade de reter e acumular os sólidos filtrados (GASCAT, 2010). O fluxo de dentro para fora do cesto garante que todo o contaminante seja retido dentro do elemento filtrante, proporcionando um dreno limpo.

Os separadores do tipo cartucho utilizam filtros de celulose plissada e podem ser opcionalmente construídos em tela metálica. Além disso, permite uma operação com maior perda de carga e, conseqüentemente, reduz o ciclo de manutenção (GASCAT, 2010). O fluxo neste equipamento ocorre de fora para dentro do elemento filtrante, o qual resulta um dreno com presença de resíduos.

A construção destes filtros é realizada utilizando-se um sistema de abertura rápida, que permite uma troca simples e fácil do elemento filtrante, proporcionando uma economia considerável nas paradas para limpeza e troca dos elementos filtrantes (GASCAT, 2010).

2.6 Meios filtrantes

Os meios filtrantes utilizados em filtração industrial atualmente englobam uma variedade considerável de materiais, incluindo as cerdas naturais, as artificiais e as sintéticas. Dependendo de como ocorre à estruturação das fibras dos meios filtrantes, elas podem ser classificadas como filtros trançados e não trançados, também denominados de feltros.

2.6.1 Filtros Trançados

Os meios filtrantes podem ser confeccionados completa ou parcialmente por trançamento das fibras (MYCOCK et al., 1995). Conforme a ABNT/TB-392 (1991), um meio filtrante trançado é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama formando um ângulo de (ou próximo de) 90°. O conjunto de fios que correm longitudinalmente em um plano é chamado de urdume que forma a estrutura básica do meio filtrante trançado, que deverá suportar o tecimento. O fio entrelaçado com o urdume é designado trama, formando-se assim o meio filtrante trançado. Uma ilustração de um filtro com estrutura trançada pode ser visualizada na Figura 2.6.

2.6.2 Filtros não trançados ou feltros

Um tecido não trançado é formado por uma estrutura plana, flexível e porosa, constituído por uma manta de fios, em que as fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso e consolidada por vias mecânicas, químicas ou térmicas. Os tecidos não trançados ou feltros geralmente trabalham bem com pós mais pesados como areia seca, pedra calcária, e grãos (MYCOCK et al., 1995).

A fabricação dos tecidos não trançados se inicia pela formação de uma manta, constituída por uma ou mais camadas de véus. Estes véus são obtidos por processos de cardagem, por fluxo de ar, por deposição eletrostática, por suspensão em meio líquido ou por fiação direta de filamentos contínuos.

Em seguida, a manta é consolidada por processos químicos, utilizando resina, secagem e polimerização; por meios mecânicos, usando agulhas que entrelaçam as fibras, costuras ou jatos de água; ou físicos, utilizando calor e pressão. Pelo próprio processo de produção, os feltros exibem muito mais poros por unidade de área que os tecidos trançados (HARDMAN, 2001). Uma ilustração de um filtro com estrutura não trançada pode ser visualizada na Figura 2.7.

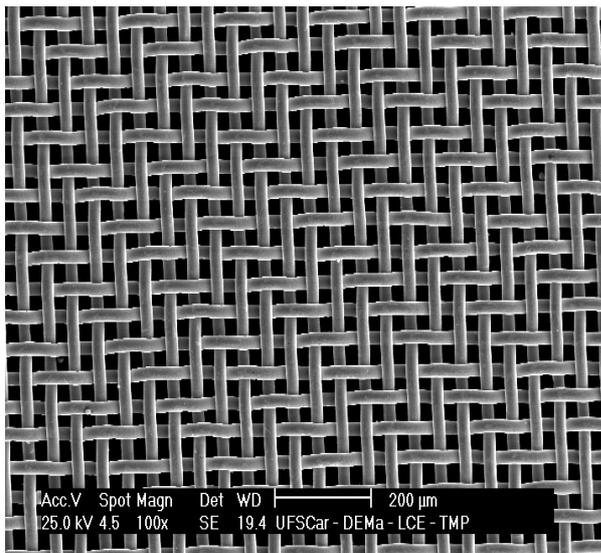


Figura 2.6: Ilustração da superfície de um filtro estrutura trançada.



Figura 2.7: Ilustração da superfície de um filtro com estrutura não trançada (Feltro).

Donovan (1985) afirmou que em tecidos não trançados a formação da torta ocorre mais lentamente que em tecidos trançados. Isto porque o espaço disponível para passagem do fluxo em um tecido trançado é mais concentrado que em um não trançado, e o bloqueio desta passagem ocorre mais rapidamente por causa deste fluxo concentrado.

Theodore e Buonicore (1998) afirmam que os feltros limpos são mais eficientes que tecidos trançados limpos, mas que estes últimos são capazes de alcançar eficiências comparáveis após uma camada de partículas ter se acumulado em sua superfície.

2.6.3 Meios filtrantes aplicados no gás natural

Os tipos de meios filtrantes aplicados na filtração de gás natural atualmente englobam uma variedade de materiais, incluindo as fibras de vidro, o polipropileno, a celulose e os fios metálicos (PALL, 2009), sendo os dois últimos mais aplicados no mercado Brasileiro (GASCAT, 2010).

Os filtros de celulose são constituídos de materiais fibrosos não trançados feitos de fibras orgânicas com estruturas aleatórias (SONG et al., 2006). Podem ser encontrados na forma tratada e não tratada, sendo este último com baixa resistência mecânica e sua aplicação como filtro mecânico é bastante limitado. Os meios filtrantes tratados apresentam a vantagem de remover uma alta proporção de partículas finas e são bastante econômicos. Entretanto, possuem alta resistência específica e limitada resistência mecânica (DICKENSON, 1994).

As membranas de celulose são em sua maioria usadas na forma plissada, permitindo uma grande área filtrante, uma vida mais longa e uma maior capacidade de retenção de sólidos (DICKENSON, 1994). Estes materiais apresentam também características por permitir a eliminação de parte das partículas penetradas na superfície e no interior do meio filtrante, por meio do fluxo de ar reverso. Isto significa que uma vez saturado, poderão ser regenerados em aproximadamente 40% de sua vida útil, a partir da primeira filtração. Regenerações subsequentes terão progressivamente menor eficácia até que o elemento sature por completo, quando será necessária a sua substituição (OSÓRIO, 2006).

Os filtros metálicos são constituídos de fibras de aço inox com diâmetros menores que 25µm, sendo as mesmas confeccionadas na forma trançada. Uma vantagem da aplicação dos filtros metálicos é que eles não são tão compressíveis sob altas pressões. A estrutura do meio filtrante pode suportar pressões de compressão de até 13,8 MPa (2000 psi). A boa resistência dos filtros metálicos é adequada para filtração de partículas rígidas ou pontiagudas, tais como, lascas de metais e pedaços de vidros. Podem também ser aplicadas na captura de contaminantes que possam ser queimados, nas limpezas de banhos ultrasônicos e nas operações de retrolavagem (LI, 1997).

Como resultado da alta rigidez, não compressibilidade, durabilidade, bem como excelente facilidade de limpeza, os filtros metálicos podem ser reutilizados diversas vezes e ainda proporcionar um bom desempenho de filtração. A reutilização dos filtros metálicos os faz um substituto em potencial para meios filtrantes que são descartáveis (LI, 1997).

2.7 Mecanismos de coleta

O gás contendo material particulado atravessa o meio filtrante composto por fibras onde as partículas se depositam. Esta deposição se dá pela combinação de vários mecanismos de coleta, sendo os mais importantes: o difusional, o inercial, a interceptação direta, o gravitacional e o eletroforético, ilustrados na Figura 2.8. Deve-se ressaltar que o transporte das partículas em um fluido está fortemente ligado à interação entre o gás e as partículas constituintes. Esta interação pode ser determinada através do número de Knudsen (Kn):

$$Kn = 2\lambda / d_p \quad (2.1)$$

que é um número adimensional, equivalente a razão entre o caminho livre médio das moléculas no gás (λ) e o diâmetro das partículas (d_p) (HINDS, 1999).

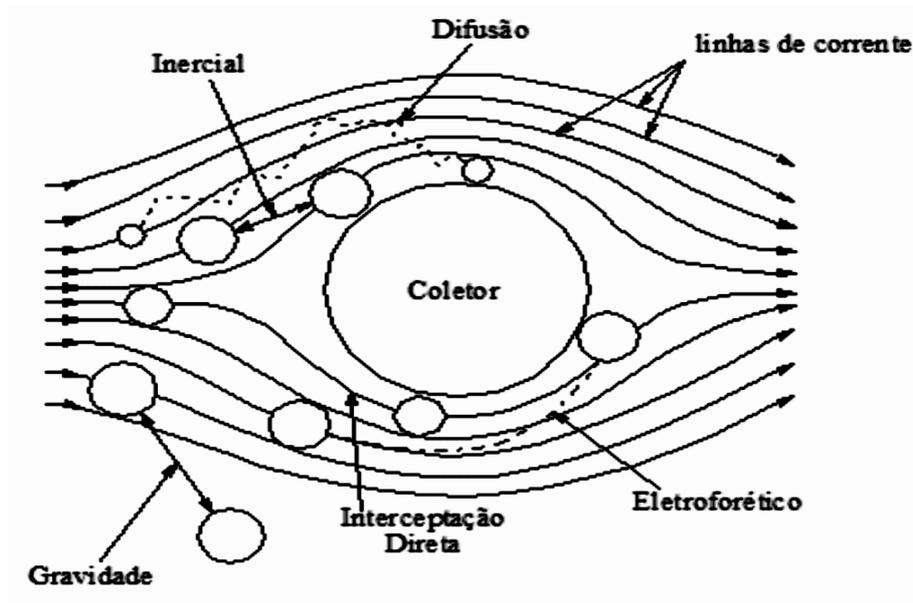


Figura 2.8 - Mecanismos físicos de coleta (SPURNY, 1998).

O caminho livre médio das moléculas no gás (λ) é definido como sendo a distância que uma molécula do gás percorre antes de se chocar com outra, podendo ser determinado por (fluido ar):

$$\lambda = \frac{2,15 \times 10^{-4} \mu T^{1/2}}{P} \quad (2.2)$$

em que P é a pressão em bar, μ a viscosidade do gás em kg/m.s e T a temperatura absoluta em Kelvin.

O comportamento da partícula em relação ao gás é caracterizado através do número de Knudsen, uma vez que o tamanho da partícula influencia o comportamento do aerossol e as leis que determinam as propriedades do mesmo (HINDS, 1999). Assim sendo, se tratando de partículas com diâmetros reduzidos, isto é, que apresentem tamanhos da ordem de grandeza

do caminho livre médio das moléculas ($Kn \gg 1$), tais partículas não avistam o meio gasoso como uma massa contínua, mas como um aglomerado de partículas. Por outro lado, se a partícula for maior que o caminho livre médio ($Kn \ll 1$), a mesma enxergará o gás como um meio contínuo.

No caso da hipótese de escoamento contínuo, a correção do efeito de interações a nível molecular, quando as partículas que escoam no fluido são pequenas, pode ser feita pelo fator de escorregamento de Cunningham (C_s) (CLIFT et al., 1978 apud STEFFENS, 2007 a):

$$C_s = 1 + Kn[1,246 + 0,42 \exp(-0,87 / Kn)] \quad (2.3)$$

O fator de escorregamento de Cunningham leva em conta a não-continuidade do meio para partículas que apresentam tamanho próximo ao caminho livre médio (λ), tais como as nanopartículas. Assim, a partir destes conceitos definidos para compreender a interação entre o gás e as partículas constituintes, tornam-se mais simples apresentar a descrição de cada mecanismo de coleta, descritos a seguir, que são representações idealizadas dos fenômenos físicos que promovem o contato partícula-fibra.

2.7.1 Mecanismo difusional

O mecanismo difusional resulta do movimento aleatório (Browniano) a que pequenas partículas estão sujeitas em um gás, conhecido como difusão browniana (COURY, 1983). Este mecanismo ocorre, predominantemente, em partículas submicrômicas e em baixas velocidades de filtração.

As partículas pequenas não seguem perfeitamente as linhas de corrente de ar devido aos seus deslocamentos pelas constantes colisões das moléculas do ar. Por isso, tais partículas

se difundem em várias direções, aumentando muito a probabilidade de se chocarem com as fibras e ali permanecerem. Ao reduzir a velocidade do gás, a eficiência tende a aumentar, porque o tempo de permanência no meio filtrante é maior.

Kirsch e Fuchs (1967 apud SPURNY, 1998) apontam que segundo os modelos de Kuwabara e Happel, a teoria da fibra individual, na qual a fibra individual não negligencia o efeito das fibras adjacentes, é o mais usado devido a sua simplicidade. Entre os dois modelos, o de Kuwabara é mais representativo para o fluxo ao redor de fibras no caso de baixos valores de Reynolds.

Lee e Liu (1982) desenvolveram um modelo empírico para a eficiência individual da fibra por difusão Browniana, apresentado pela seguinte equação:

$$\eta_d = 1,6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2.4)$$

em que α é a densidade de empacotamento (1- ϵ), Ku é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara e Pe é o número de Peclet, sendo representado pelas seguintes equações, respectivamente:

$$Ku = -\frac{\ln \alpha}{2} - 0,75 + \alpha - 0,25\alpha^2 \quad (2.5)$$

$$Pe = U_o d_f / D \quad (2.6)$$

Sendo U_o a velocidade do gás, D é o coeficiente de difusividade e d_f é o diâmetro das fibras.

O coeficiente de difusividade D , associado ao movimento Browniano, pode ser estimado a partir da equação de Stokes-Einstein. Para partícula de diâmetro esférico d_p , o coeficiente D é representado por:

$$D = K_B C_s T / (3\pi\mu d_p) \quad (2.7)$$

na qual K_B é a constante de Boltzman, T a temperatura absoluta, C_s o fator de escorregamento de Cunningham e μ a viscosidade do gás.

O mecanismo difusional é significativo somente para partículas muito pequenas. Geralmente a deposição Browniana de partículas em um meio fibroso pode ser considerada como um processo de transferência de massa. Para condições de baixos números de Reynolds e $d_p < 1\mu\text{m}$ existe uma boa aderência entre a partícula e o coletor (STENHOUSE, 1975 apud STEFFENS, 2007 a), e o processo pode ser considerado análogo à difusão molecular de um gás para um sólido. Portanto, é possível aplicar as correlações de transferência de massa convencionais, utilizando-se D em vez da difusividade molecular.

A correlação desenvolvida por Lee e Liu (1982), apresentada na Equação (2.4), é aplicável para um regime de fluxo contínuo, sendo caracterizado por baixos valores de números de Knudsen relativo à fibra coletora. Neste sentido, os efeitos de escorregamento tornam-se importantes na descrição do fluxo ao redor da fibra que são maiores para fibras finas (LIU e RUBOW, 1990).

Desta forma, Liu e Rubow (1990) sugeriram que o efeito de escorregamento do gás poderia ser levado em conta Equação (2.4), através de um termo de correção (C_d):

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

em que C_d é expresso como:

$$C_d = 1 + 0,388 Kn_f \left[\frac{(1-\alpha)Pe}{Ku} \right]^{1/3} \quad (2.9)$$

O número de Knudsen (Kn_f) em relação ao diâmetro da fibra (d_f), pode ser calculado por:

$$Kn_f = 2\lambda / d_f \quad (2.10)$$

Entretanto, Payet et al. (1992) notaram que o valor de η_d da Equação (2.8) pode exceder a unidade para baixos valores de Peclet (Pe), ou seja, para partículas pequenas e para baixas velocidades de filtração. Desta forma, tais autores modificaram a Equação (2.8) para se obter $\eta_d < 1$ para partículas muito finas:

$$\eta_d = 1,6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d C_d' \quad (2.11)$$

na qual o termo C_d' é dado pela seguinte expressão:

$$C_d' = \frac{1}{1 + 1,6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} C_d} \quad (2.12)$$

2.7.2 Mecanismo inercial

Este mecanismo é resultante da inércia das partículas que estão presentes em uma corrente gasosa. As linhas de corrente do gás se curvam ao passar em torno de um coletor e a

capacidade da partícula de acompanhar estas linhas decresce com o aumento de sua massa, devido à inércia. Este mecanismo é predominante para altas velocidades de gás (COURY, 1983; HINDS, 1999).

Contudo, em escoamento com elevados Re , a hipótese de perfeita aderência da partícula ao coletor torna-se questionável, principalmente para aerossóis sólidos. Neste caso, existe grande possibilidade da partícula chocar-se com o coletor (havendo a coleta) e, em seguida retornar à corrente gasosa por choque elástico. Esta é, provavelmente, uma das razões que explicam os dados discrepantes encontrados na literatura para a eficiência de coleta inercial (STEFFENS, 2007 a).

Segundo Willeke e Baron (1993), o número de Stokes (St) é o parâmetro básico para descrever o mecanismo inercial para coleta de partículas em filtros. Se o número de Stokes for alto, a probabilidade de coleta pelo mecanismo inercial aumenta, no entanto, se ele for pequeno indica uma baixa probabilidade de coleta por este mecanismo. Este parâmetro pode ser determinado como:

$$St = \frac{C_s \rho_p d_p^2 U_o}{18 \mu d_f} \quad (2.13)$$

sendo ρ_p a densidade da partícula.

Landahl e Hermann (1949 apud SPURNY, 1998) propuseram um cálculo que determina a eficiência de filtração das partículas pelo mecanismo inercial:

$$\eta_i = \frac{St^3}{St^3 + 0,77St^2 + 0,22} \quad (2.14)$$

Tal expressão é amplamente utilizada para calcular a contribuição pelo mecanismo inercial.

2.7.3 Mecanismo de interceptação direta

A interceptação direta é resultante do tamanho relativo entre a partícula e o coletor. Este mecanismo é significativo para partículas de diâmetro grande, com d_p de ordem de grandeza pouco abaixo do diâmetro do coletor (d_f) (COURY, 1983). Uma partícula que segue as linhas de corrente do gás pode ser capturada quando seu centro passa pela superfície do coletor a uma distância menor ou igual ao seu raio. A coleta por tal mecanismo depende das propriedades de transporte do fluido e da razão entre diâmetro da partícula e diâmetro do coletor ($R = d_p/d_f$). Portanto, o mecanismo de interceptação direta é função desta razão, R .

Ainda, segundo Liu e Rubow (1990), o efeito de escorregamento do gás deve ser levado em conta na descrição do fluxo ao redor da fibra em casos que o diâmetro da fibra é da mesma ordem de grandeza que o caminho livre médio das moléculas do gás. Em relação a tal efeito, estes mesmos autores propuseram a adição de um fator de correção na equação de eficiência de coleta do mecanismo de interceptação direta proposta por Lee e Liu (1982). A expressão proposta por Lee e Liu (1982) juntamente com o fator de correção (C_r) sugerido por Liu e Rubow (1990) é representada por:

$$\eta_{id} = 0,6 \left(\frac{1-\alpha}{Ku} \right) \frac{R^2}{1+R} C_r \quad (2.15)$$

sendo,

$$C_r = 1 + \frac{1,996Kn_f}{R} \quad (2.16)$$

2.7.4 Mecanismo gravitacional

O mecanismo gravitacional é o resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, causando um desvio na sua trajetória normal. É predominante para baixas velocidades do gás e grandes partículas ($St > 10$). A eficiência de coleta depende da direção do fluxo e do sentido da corrente gasosa, uma vez que em um fluxo de cima para baixo existe a tendência das partículas se aproximarem do coletor (COURY, 1983).

A eficiência de coleta descrita por tal mecanismo pode ser estimada por (TIEN, 2007):

$$\eta_g = \frac{(\alpha)^{2/3} v_t}{U_o} \quad (2.17)$$

na qual v_t é a velocidade terminal da partícula, sendo determinada por:

$$v_t = \frac{d_p^2 g \rho_p}{18\mu} \quad (2.18)$$

em que, g é a aceleração da gravidade.

2.7.5 Mecanismo eletroforético

O mecanismo eletroforético é importante quando as partículas são carregadas eletricamente (STEFFENS, 2007 a), o qual não foi o objetivo do presente estudo. Porém, será apresentada uma breve descrição deste mecanismo.

As forças eletrostáticas podem contribuir para o aumento da eficiência na coleta de partículas durante a filtração. A presença destas forças num filtro pode ser devido à presença de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou no coletor, ou ainda, pode ser induzida por um campo elétrico externo.

A atração entre partícula e coletor ocorre através de vários mecanismos, identificados por (COURY 1983):

- atração entre partícula carregada e o coletor com carga oposta (força Coulômbica);
- atração entre partícula carregada e seu dipolo-imagem no coletor;
- atração entre partícula carregada e seu dipolo-imagem na partícula;
- repulsão de uma partícula carregada por partícula vizinha com carga similar;
- atração entre partícula carregada e o coletor aterrado, com carga oposta induzida por partículas vizinhas.

2.7.6 Coleta simultânea por diversos mecanismos

Geralmente, admite-se eficiência total de um coletor como a soma das eficiências individuais. Isto não é inteiramente correto, uma vez que há influência de um mecanismo sobre o outro (COURY, 1983). A Figura 2.9 apresenta a eficiência de coleta de uma fibra individual para cada mecanismo. O filtro possui uma espessura de 1 mm, porosidade de 0,95; diâmetro do coletor igual a 2,0 μm e velocidade de 0,1 m/s.

Observa-se na Figura 2.9, que o mecanismo difusional é mais atuante nas partículas menores que 0,2 μm , enquanto os mecanismos inercial e o de interceptação direta são mais atuantes para partículas maiores que 1,0 μm .

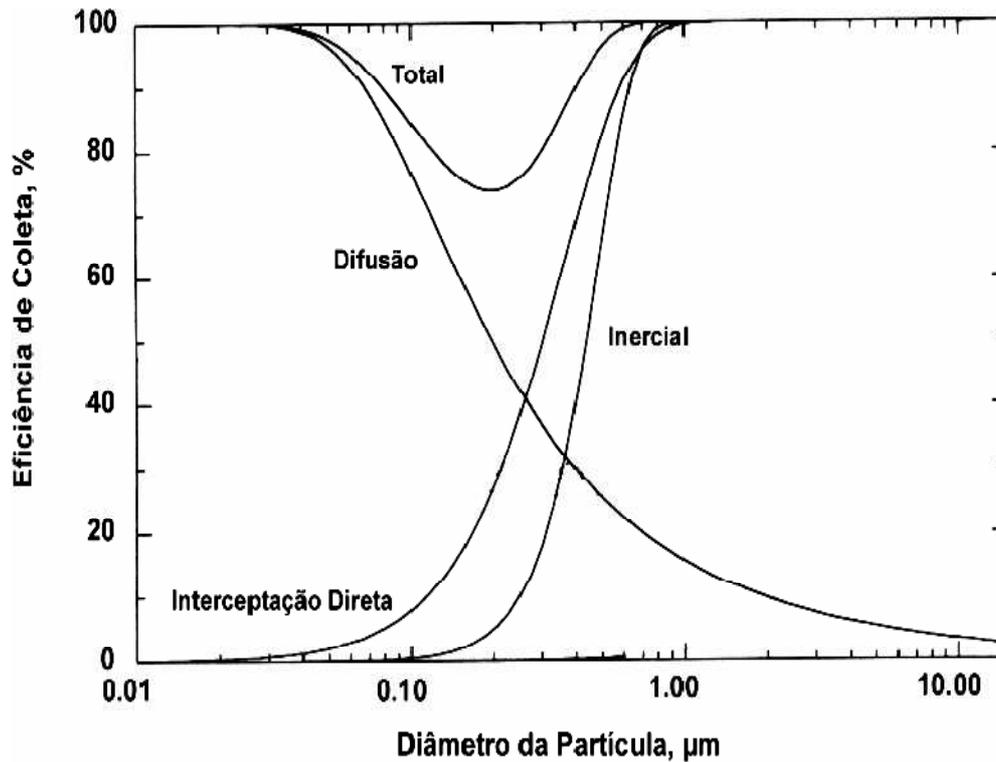


Figura 2.9 - Atuação dos mecanismos de coleta e as eficiências correspondentes (HINDS, 1999).

2.8 Variáveis na filtração de gases

A permeabilidade do meio filtrante, a perda de carga, a porosidade do meio filtrante e da torta de filtração e a eficiência de coleta dos filtros, são variáveis essenciais na filtração de gases e serão apresentadas a seguir.

2.8.1 Permeabilidade do meio filtrante

A permeabilidade é um parâmetro importante na avaliação da qualidade de um filtro. Também deve ser considerada na seleção de um meio filtrante. Nas aplicações de filtração, baixas permeabilidades usualmente implicam em baixas taxas de filtração, o que não é economicamente vantajoso para o processo. No entanto, em outros casos, estrutura com baixa

permeabilidade pode ser requerida como prevenção à penetração de agentes indesejáveis que deterioram o material.

A permeabilidade é a propriedade que indica a maior ou menor facilidade à passagem da corrente de gás através do meio filtrante. A complexa interação entre o fluido e o meio poroso causa uma transformação na energia do sistema, geralmente associada à diminuição da pressão exercida pelo fluido. A permeabilidade é assim, uma propriedade não apenas do meio poroso ou do fluido, mas também da interação dinâmica entre eles (INNOCENTINI, et al., 1999).

A permeabilidade de tecidos de filtração é bastante reduzida pelo depósito de pó residual. Isto leva a uma pequena relação entre a permeabilidade do tecido limpo e a do tecido usado. O objetivo ao confeccionar um filtro é mantê-lo altamente permeável, tanto limpo quanto impregnado por pó, considerando que a mínima, ou nenhuma quantidade de pó o atravesse (BUONICORE e DAVIS, 1992).

Dentre as diversas correlações encontradas na literatura, relacionando as propriedades estruturais do material poroso e a constante de permeabilidade em situações específicas de escoamento, a Equação de Forchheimer (Equação 2.19) é um exemplo de equação empírica que descreve a resistência do escoamento através do filtro. Na forma diferencial a Equação de Forchheimer pode ser expressa como:

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (2.19)$$

em que $-dP/dx$ é o gradiente de pressão ao longo da direção do escoamento x ; μ e ρ são respectivamente a viscosidade e densidade absoluta do fluido. A velocidade superficial v_s é definida como a razão entre vazão volumétrica do fluido (Q) pela área nominal da face exposta ao escoamento (A). Os parâmetros k_1 e k_2 são conhecidos como coeficientes de

permeabilidade Darciana e não Darciana, em referência a lei de Darcy, a qual estabelece uma dependência linear entre perda de carga e a velocidade do fluido (INNOCENTINI et al., 2005).

A velocidade superficial do gás (v_s) através do filtro pode ser calculado com base na vazão mássica do gás (w), densidade do fluido (ρ) e área da superfície exposta ao escoamento (A_f):

$$v_s = \frac{w}{\rho A_f} \quad (2.20)$$

Entretanto, para uma vazão mássica constante ($w=\text{constate}$), a integração da Equação (2.19) ao longo da espessura do elemento filtrante dx deve levar em conta as mudanças da densidade (ρ) e área de filtração sobre a velocidade superficial (v_s). Gases e vapores sofrem uma expansão volumétrica durante a passagem do gás através do filtro proporcional a redução na pressão absoluta do gás. Uma vez que a perda de carga no filtro é relativamente pequena comparada à pressão absoluta do gás na qual a filtração ocorre, tal redução na densidade do gás pode ser razoavelmente representada na modelagem de permeabilidade assumindo que a lei dos gases ideais é válida.

Por outro lado, a área de filtração (A_f) depende da geometria do filtro. Duas geometrias comumente aplicadas são: disco plano e cilindro vazado. A Figura 2.10 apresenta a ilustração destas geometrias e as respectivas orientações do fluxo (perpendicular, radial para o interior do cilindro vazado e radial para exterior do cilindro vazado). Para fluxo radial através dos cilindros vazados, a área da face aumenta com o raio ($A_f=2\pi rH$), enquanto é constante para fluxos através dos discos planos (INNOCENTINI et al., 2011).

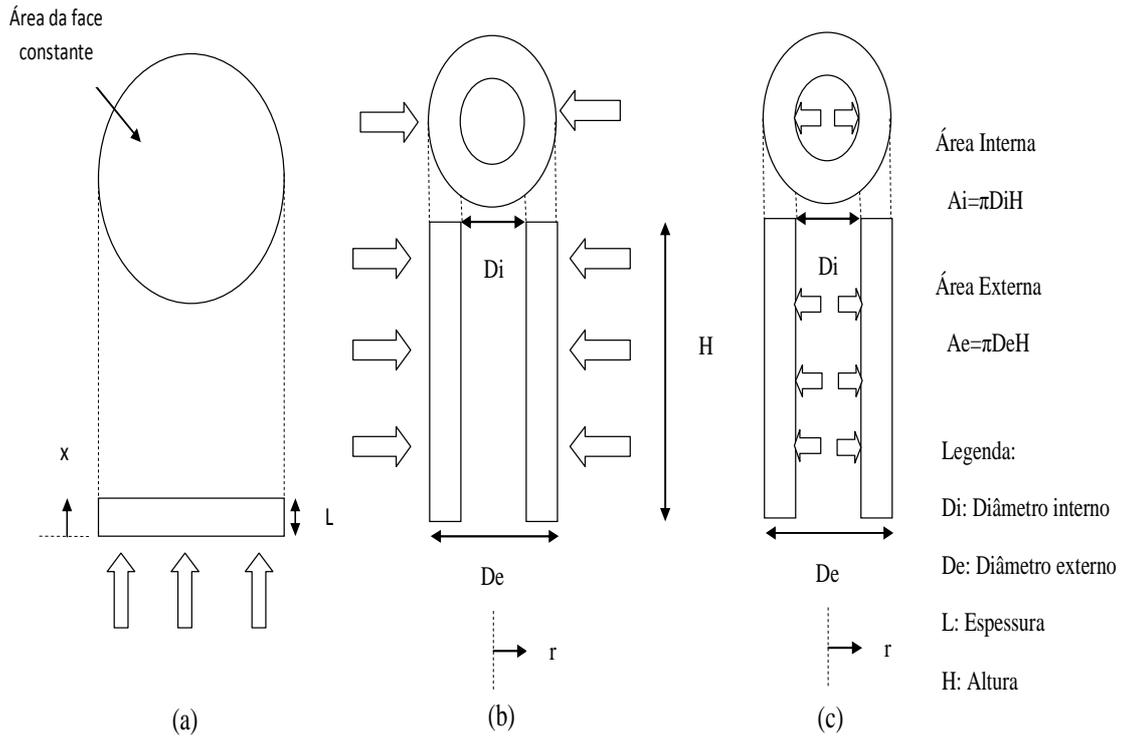


Figura 2.10: Geometrias típicas e orientações no fluxo para os elementos filtrantes; (a) disco plano; (b) Fluxo radial para o interior do cilindro vazado; (c) Fluxo radial para o exterior cilindro vazado (INNOCENTINI et al., 2011).

Os resultados da integração da Equação de Forchheimer para as coordenadas retangulares e cilíndricas para fluidos compressíveis (ρ variável) estão apresentados como:

- Fluxo cruzado através de discos plano:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (2.21)$$

- Fluxo radial através do cilindro vazado:

$$\frac{\Delta P}{(D_e/2)} = \frac{\mu}{k_1} \ln\left(\frac{D_e}{D_i}\right) v_s + \frac{\rho}{k_2} \left(\frac{D_e - D_i}{D_i}\right) v_s^2 \quad (2.22)$$

O parâmetro da queda de pressão é calculado por (INNOCENTINI, et al., 2005):

$$\Delta P = \frac{P_i^2 - P_o^2}{2P_o} \quad (2.23)$$

Na Equação (2.21), L é a espessura do meio filtrante (para discos planos), enquanto na Equação (2.22), D_i e D_e são os diâmetros internos e externos (para cilindros vazados). P_i e P_o são as pressões absolutas na entrada e na saída do filtro. Os parâmetros ρ , μ e v_s são respectivamente a densidade, a viscosidade e a velocidade superficial do gás referentes a pressão P_o . Para situações na qual a descompressão do gás não é importante, a Equação (2.23) pode ser simplificada para:

$$\Delta P = P_i - P_o \quad (2.24)$$

Do ponto de vista físico, a Equação de Forchheimer relata que a perda de energia no escoamento do fluido é devido ao somatório de duas contribuições que coexistem. Existe uma concordância na literatura que, para baixas velocidades, a energia é dissipada predominantemente devido ao atrito entre as camadas do fluido (fricção do fluido), como ocorre em fluxos laminares em canais retos. Esta perda de energia (pressão) é representada apenas pelo termo linear da velocidade nas Equações (2.21 e 2.22). Com o aumento da velocidade, à mudança na direção do movimento e aceleração ou desaceleração do fluido causado pela mudança da trajetória do fluido intensifica a dissipação de energia. O aumento

na dissipação permite um aumento da não linearidade da queda de pressão representada pelo termo quadrático da velocidade nas Equações (2.21 e 2.22). Vale ressaltar que a não linearidade também é conhecida como o efeito inercial, que ocorre ainda dentro do fluxo de regime laminar e não é necessariamente relatado para a turbulência (INNOCENTINI et al., 2009).

Os coeficientes de permeabilidade k_1 e k_2 são dimensionalmente distintos: k_1 é expresso em dimensões de área (m^2), enquanto que k_2 é expresso em dimensões de comprimento (m). Ambos os parâmetros são considerados apenas dependentes das propriedades do meio filtrante e, portanto, deve-se manter constante mesmo com mudanças nas características do fluido (INNOCENTINI et al., 2005). Por outro lado, modificações no caminho do fluido causado pelo efeito de temperatura (expansão térmica) ou pela mudança nos efeitos da pressão (compactação, alongamento ou deformação nas fibras) podem resultar em mudanças nos valores de k_1 e k_2 .

A fim de avaliar o regime do escoamento e a validade das correlações empíricas para materiais fibrosos, o número de Reynolds da fibra (Re_f) e o número de Forchheimer (Fo) podem ser calculados por (INNOCENTINI et al., 2005):

$$Re_f = \frac{\rho v_s d_f}{\varepsilon \mu} \quad (2.25)$$

$$Fo = \frac{\rho v_s (k_1 / k_2)}{\mu} \quad (2.26)$$

O número de Forchheimer pode ser entendido como uma analogia no número de Reynolds da fibra, sendo a característica do comprimento d_f podendo ser substituída pela razão k_1/k_2 , o qual tem dimensões de comprimento. Fo relaciona a linearidade da curva de

perda de carga da mesma maneira que Re_f relaciona o regime de escoamento do fluido. Para $Fo \ll 1$, os efeitos inerciais são desprezíveis e a Equação (2.21) reduz para lei de Darcy (INNOCENTINI et al., 2005).

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{viscoso}} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (2.27)$$

Por outro lado, quando $Fo \gg 1$, os efeitos viscosos podem ser desprezíveis e a perda de carga pode ser razoavelmente estimada através do termo quadrático da Equação (2.21):

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{inercial}} = \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (2.28)$$

Para qualquer outra condição intermediária de fluxo a completa Equação de Fochheimer (Equação 2.21) deve ser usada para estimar a queda de pressão através do filtro:

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{total}} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{viscoso}} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{\text{inercial}} \quad (2.29)$$

As porcentagens das contribuições viscosas e inerciais na queda de pressão podem ser facilmente determinadas por:

$$\Delta P_{\text{viscoso}} (\%) = 100 \cdot \left(\frac{1}{1 + Fo}\right) \quad (2.30)$$

$$\Delta P_{inercial}(\%) = 100 \cdot \left(\frac{Fo}{1 + Fo} \right) \quad (2.31)$$

A faixa de classificação do regime laminar ou turbulento baseado no número de Reynolds é diferente ao usado no número de Forchheimer para determinar as contribuições viscosas e inerciais. O regime laminar é usado para $Re < 10$ enquanto para regime turbulento o $Re > 300$ (SEGUIN, et al., 1998 a-b).

A seguir, serão descritos resumidamente alguns trabalhos experimentais que envolvem a permeação de meios porosos em pressões elevadas.

Loosveldt et al., (2002) estudaram a permeabilidade para pressões variando de 0,8 MPa até 4 MPa, em amostras de argamassas através da injeção do gás argônio e concluíram que ocorreu um decréscimo da permeabilidade com o aumento da pressão.

Davy et al., (2007) estudaram a permeabilidade para três diferentes amostras de argila com macro-fissuras diferentes. Os autores observaram quando estas amostras foram submetidas a maiores pressões (até 17 MPa), a permeabilidade da argila diminuiu com o aumento da pressão.

Tanikawa e Shimamoto (2009) fizeram um estudo de permeabilidade para quatro diferentes formações de rochas sedimentares com a injeção do gás nitrogênio. Os autores observaram que rochas mais porosas, com maiores tamanhos de poros, foram as que apresentaram maiores permeabilidades, mostrando a dependência da permeabilidade com estes parâmetros. Quando as rochas foram submetidas a um aumento da pressão efetiva (variando entre 5 MPa a 160 MPa) os autores observaram que ocorreu uma diminuição da permeabilidade das rochas.

Os três estudos mencionados anteriormente foram realizados utilizando a Lei de Darcy para fluidos compressíveis.

Innocentini e Pandolfelli (2001) observaram que os efeitos inerciais não considerados pela Equação de Darcy são as causas da variação da constante de permeabilidade do gás ($k_{gás}$), com a pressão média (P_m). A dependência de $k_{gás}$ e P_m no fluxo do fluido foi explicado baseado na Equação de Forchheimer.

2.8.2 Relação entre permeabilidade e outras características estruturais do meio filtrante

Os coeficientes de permeabilidade k_1 e k_2 podem ser afetados qualitativamente através de outras características estruturais do filtro entre as quais se destacam a porosidade e o tamanho de poros.

Porosidade (ε): o aumento da fração de vazios reduz a velocidade intersticial e aumenta as constantes de permeabilidades. Modelos simplistas assumem uma influência linear entre ε e k_1 e quadrática entre ε e k_2 para materiais celulares (INNOCENTINI et al., 2009).

Tamanho dos poros (d_{poros}): o aumento do tamanho dos poros facilita a deposição interna das partículas nos meios filtrantes, o qual diminui a eficiência de coleta dos mesmos (FREITAS et al., 2006). Em relação ao escoamento do fluido, um aumento do tamanho dos poros reduz a área de fricção e a tortuosidade, mudando a direção do escoamento e velocidade do fluido, no qual as constantes de permeabilidade aumentam. Alguns modelos assumem k_1 com relação direta d_{poro}^2 e k_2 com d_{poro} , embora esta tendência ainda seja controversa para materiais celulares (INNOCENTINI et al., 2009).

2.8.3 Perda de carga

A queda de pressão ou perda de carga é uma variável fundamental de projeto, que descreve a resistência do fluxo de gás ao passar pelo filtro. A queda de pressão total de um

sistema é determinada pela medida da diferença de pressão total em dois pontos do filtro, usualmente medida na entrada e na saída (SEVILLE, 1997).

O aumento da perda de carga do sistema ocorre à medida que as partículas são depositadas durante os ciclos de filtração, sendo ΔP um fator determinante na frequência de limpeza dos filtros (JEON e JUNG, 2004).

Em operações de filtração, geralmente, a equação que descreve a queda de pressão total (ΔP_t) é dividida em duas partes, a queda de pressão no meio filtrante (ΔP_m) e a queda de pressão devido a formação da torta (ΔP_c) descrita por:

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \Delta P_c \quad (2.32)$$

Como a espessura do meio filtrante permanece constante durante a operação de filtração, tem-se a seguinte equação:

$$\Delta P_m = k_m v_s \quad (2.33)$$

sendo k_m a resistência específica do tecido e v_s a velocidade superficial de filtração.

No caso da queda de pressão devido à formação da torta, a espessura L_c da torta não é constante, sendo difícil de ser medida. Entretanto ela pode ser calculada pela massa de pó depositada por unidade de área (W), conhecendo-se a densidade da partícula (ρ_p) e a porosidade da torta (ε), conforme apresentada na equação:

$$L_c = \frac{W}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.34)$$

Para o escoamento de um fluido incompressível puramente viscoso, a equação de Darcy pode ser aplicada:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (2.35)$$

sendo ΔP a queda de pressão na direção do escoamento, μ a viscosidade do fluido, L espessura do meio filtrante e k_1 a constante de permeabilidade Darciana.

Substituindo a Equação (2.34) na Equação (2.35), define-se a queda de pressão devido ao escoamento do gás através da torta (ΔP_c) como:

$$\Delta P_c = k_c v_s W \quad (2.36)$$

sendo $k_c = [\mu/k_1 \rho_p (1-\varepsilon)]$ a resistência específica da torta (LEITH e ALLEN, 1986).

Logo, a queda de pressão total (ΔP_t) pode ser apresentada pela equação:

$$\Delta P_t = k_m v_s + k_c v_s W \quad (2.37)$$

2.8.4 Porosidade do meio filtrante

A porosidade mede a proporção de espaços vazios do meio filtrante, além de ser um parâmetro fundamental para a escolha do filtro devido a sua relação com a eficiência de coleta de partículas. Segundo Pich (1987), para filtros de alta porosidade (usualmente maiores que 90%), a eficiência aumenta com a redução da porosidade. Entretanto, a diminuição da porosidade aumenta a perda de carga inicial no filtro, aumentando a potência requerida pelo

sistema. É importante destacar que quanto maior a porosidade do meio filtrante, maior a quantidade de partículas que depositam internamente no elemento filtrante. Este processo dificulta a limpeza podendo ocorrer a colmatção total dos filtros, sendo necessária a troca do mesmo.

Dentre as várias correlações existentes na literatura a de Ergun (1952) é a mais utilizada:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu v_s}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \rho_g v_s^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.38)$$

sendo ρ_g a densidade do gás, μ a viscosidade do gás, ε a porosidade do meio poroso, v_s a velocidade superficial de filtração, d_p o diâmetro médio das partículas e L a espessura do meio poroso.

2.8.5 Porosidade da torta de filtração

A porosidade das tortas de filtração merece destaque, porque a queda de pressão no filtro ΔP , a resistência ao escoamento do fluido e a força necessária para a remoção da torta dependem deste parâmetro, que está diretamente relacionada à compressibilidade da torta (KIM et al., 2008). Durante a filtração, a camada de pó formada na superfície do meio filtrante pode sofrer compactação, resultando na redução da porosidade, e consequente aumento de ΔP .

A porosidade da torta é difícil de ser estimada experimentalmente, devido à grande fragilidade da camada de pó formada na superfície do filtro. No entanto, ela pode ser

determinada indiretamente, ou seja, obtida a partir de correlações teóricas que descrevam a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido.

Coury (1983) desenvolveu um método para estimar a porosidade das tortas de filtração de gases indiretamente, a partir da correlação de Ergun (1952), dada pela Equação (2.38).

A espessura da torta pode ser estimada a partir da seguinte equação:

$$M = Qt = LA\rho_p(1 - \varepsilon) \quad (2.39)$$

sendo M a massa de pó depositada, Q a vazão mássica de pó por unidade de tempo(t), A a área superficial da torta e ρ_p a densidade das partículas. Logo define-se L como:

$$L = \frac{Qt}{A\rho_p(1 - \varepsilon)} \quad (2.40)$$

Substituindo a Equação (2.40) na Equação (2.38), obtém-se a equação de Ergun em função ao tempo de filtração:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1 - \varepsilon)\mu Q v_s}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} + \frac{1,75 Q \rho_g v_s^2}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p} \quad (2.41)$$

O primeiro termo da Equação (2.41) é relativo aos componentes viscosos e o segundo termo é relativo ao componente inercial, sendo este último desprezível no caso de escoamentos puramente viscosos como nos gases. Esta equação pode ser utilizada para estimar a porosidade da torta através de dados experimentais de perda de carga (ΔP) versus tempo (t) (SILVA et al., 1999).

Endo et al., (1998) consideraram o formato das partículas, assim como a não homogeneidade do material particulado, como fatores que influenciam na porosidade da torta de filtração e propuseram a seguinte equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 k (1 - \varepsilon)^2 \mu v_s}{\varepsilon^3 d_p^2 \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \quad (2.42)$$

em que σ_g é o desvio padrão do diâmetro geométrico das partículas, k é o fator de forma ($4 \ln^2 \sigma_g$) que é influenciada pela dispersão dos tamanhos das partículas que compõe o material particulado. O fator de forma dinâmico (k) de uma partícula é definido como a força de arraste da partícula em uma dada velocidade, dividida pela força de arraste de uma esfera de mesmo volume em uma mesma velocidade, sendo esta calculada por:

$$k = \frac{c_e}{c_{st}} \left(\frac{d_e}{d_{st}} \right)^2 \quad (2.43)$$

sendo d_e o diâmetro de uma esfera equivalente, d_s o diâmetro de Stokes e c_e e c_{st} o fator de correção de Cunningham para os diâmetros d_e e d_{st} , respectivamente.

Substituindo a espessura L (Equação 2.40) na Equação (2.42) tem-se a Equação de Endo em função do tempo de filtração:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{180 k (1 - \varepsilon) \mu v_s}{\varepsilon^3 d_p^2 \exp(4 \ln^2 \sigma_g)} \frac{Q}{A \rho_p} \quad (2.44)$$

Endo et al., (2001) determinaram a porosidade de tortas de filtração de gases, para diferentes materiais particulados, trabalhando com partículas esféricas monodispersas e

partículas com formatos irregulares polidispersos. Os autores observaram que as partículas esféricas monodispersas apresentaram menores valores de porosidade em relação às partículas irregulares polidispersas.

Rudnick e First (1978) desenvolveram uma equação para a resistência específica da torta, derivado do modelo de célula de Happel, para descrever a queda de pressão através da torta. O modelo de célula de Happel trata a torta de filtração como uma associação de partículas individuais, em que cada célula contém uma partícula rodeada por uma casca esférica concêntrica. A porosidade da torta é igual à razão entre volume da casca esférica e a partícula (CHENG e TSAI, 1998). Estas considerações permitiram soluções exatas da equação de Navier-Stokes, assumindo-se que os termos inerciais são desprezíveis. Logo a Equação de Rudnick-Happel pode ser expressa como:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{18(1-\varepsilon)\mu v_s}{d_p^2 c} \frac{3 + 2(1-\varepsilon)^{5/3}}{3 - 4,5(1-\varepsilon)^{1/3} + 4,5(1-\varepsilon)^{5/3} - 3(1-\varepsilon)^2} \quad (2.45)$$

sendo c o fator de correção de Cunningham.

Substituindo a espessura L (Equação 2.41) na Equação (2.45) tem-se a Equação de Rudnick-Happel em função do tempo de filtração:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{18\mu v_s}{d_p^2 c} \frac{3 + 2(1-\varepsilon)^{5/3}}{3 - 4,5(1-\varepsilon)^{1/3} + 4,5(1-\varepsilon)^{5/3} - 3(1-\varepsilon)^2} \frac{Q}{A\rho_p} \quad (2.46)$$

Outros métodos para determinação da porosidade da torta foram estudados por Aguiar (1995) e Cheng e Tsai (1998).

Aguiar (1995) determinou a porosidade a partir da obtenção de imagens representativas da seção transversal de tortas de filtração obtidas por meio de um microscópio

eletrônico de varredura (MEV). Posteriormente, essas imagens foram analisadas no programa Image Pro Plus, sendo este método denominado como método direto.

Cheng e Tsai (1998) determinaram a porosidade usando valores de espessura da torta medida em um equipamento a laser e da massa de pó depositada no meio filtrante por unidade de área. Segundo os autores, as partículas de formatos irregulares e com estreita faixa de distribuição granulométrica, são conduzidas ao filtro intercalando-se umas sobre as outras ao acaso e de maneira irregular, aumentando a porosidade, enquanto as partículas esféricas, por terem o mesmo formato, preenchem mais os espaços intersticiais permitindo uma menor porosidade.

2.8.6 Eficiência de coleta dos filtros

Considere uma corrente de aerosol a uma velocidade v_s e concentração C_i escoando perpendicularmente a uma fina seção fibrosa de espessura dL e a área A_f . A espessura dL deve ser muito maior que o diâmetro da fibra, porém fino o suficiente para se aproximar de uma simples camada de fibra no plano da seção, ou seja, é negligenciada a sobreposição das fibras (DULLIEN, 1989). Assumindo que L_f seja o comprimento da fibra por unidade de volume, logo o comprimento da fibra nesta seção é $L_f A_f dL$.

A área projetada das fibras cilíndricas desordenadas no plano da seção pode ser representada pela multiplicação entre o diâmetro da fibra e seu comprimento:

$$A_p = d_f L_f A_f dL \quad (2.47)$$

A eficiência total de coleta η_t (que inclui todos os mecanismos de coleta) para uma única fibra pode ser representada por:

$$\eta_t = \frac{N_D}{N_C} \quad (2.48)$$

sendo N_D o número de partículas depositadas por unidade de tempo e N_C o número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo.

O número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo, N_C , pode ser representado pela seguinte expressão:

$$N_C = v C d_f L_f A_f d_L \quad (2.49)$$

sendo C o número de partículas por unidade de volume do gás e v é a velocidade intersticial do gás. A velocidade intersticial é determinada pela razão entre a velocidade superficial do gás (v_s) e a porosidade do filtro (ε).

O número de partículas depositadas nesta seção por unidade de tempo, N_D , pode ser expresso por um balanço de massa através da seguinte equação (DULLIEN, 1989):

$$N_D = -dC(v_s A_f) \quad (2.50)$$

em que $-dC$ representa a variação das concentrações do gás que entram e deixam a seção $v_s A_f$, a vazão volumétrica do gás.

Substituindo as Equações (2.49) e (2.50) na Equação (2.48), obtém-se:

$$\frac{-dC}{C} = \frac{\eta_t d_f L_f}{\varepsilon} dL \quad (2.51)$$

Integrando a Equação (2.51), utilizando os seguintes limites de integração $L = 0$ para $C = C_i$ e $L = L$ para $C = C_o$, tem-se:

$$\ln \frac{C_o}{C_i} = - \frac{\eta_t L_f d_f L}{\varepsilon} \quad (2.52)$$

sendo C_i e C_o as concentrações das partículas na entrada e na saída do filtro, respectivamente.

A fração volumétrica ocupada pelas fibras (β) pode ser descrita por:

$$\beta = \frac{\pi d_f^2 L_f}{4} \quad (2.53)$$

O volume total da seção é constituído pela soma da fração volumétrica ocupado pelas fibras, β e o volume de vazios, ε . Esta relação pode ser descrita como:

$$\varepsilon = 1 - \beta \quad (2.54)$$

Substituindo as Equações (2.53) e (2.54) em (2.52), obtém-se:

$$P_n = \frac{C_o}{C_i} = \exp \left[- \frac{4 L (1 - \varepsilon) \eta_t}{\pi \varepsilon d_f} \right] \quad (2.55)$$

sendo P_n a penetração no qual representa a fração numérica de partículas que não são coletadas pela seção, embora tenham passado pelo filtro.

De acordo com a Equação (2.56), a concentração de partículas na corrente gasosa que atravessa a seção filtrante decai exponencialmente com o aumento da espessura do filtro (L) e

da eficiência total de coleta de cada fibra (η_t), e com o decréscimo do diâmetro da fibra (d_f), desde que a porosidade do filtro (ε) se mantenha constante.

A eficiência do filtro é definida como sendo a fração de partículas que é coletada pelo meio filtrante. Neste sentido, a relação entre a eficiência de coleta (E) e a penetração (P_n) é apresentada como:

$$E = 1 - P_n = 1 - \exp \left[- \frac{4 L (1 - \varepsilon) \eta_t}{\pi \varepsilon d_f} \right] \quad (2.56)$$

A eficiência total de coleta das partículas para um coletor (η_t) é determinada pela soma de todos os mecanismos de coletas, apresentados na Seção 2.7: difusional (η_d), inercial (η_i), interceptação direta (η_{id}), gravitacional (η_g) e eletroforético (η_e). Desta forma, obtém-se:

$$\eta_t = \eta_d + \eta_i + \eta_{id} + \eta_g + \eta_e \quad (2.57)$$

Considerando que existe uma forte dependência entre o diâmetro das fibras com a eficiência de coleta, Steffens e Coury (2007 b) propuseram que o leito de filtro pudesse ser visualizado como uma superposição de n filtros, cada um composto por fibras com uma ampla faixa de tamanhos. Consequentemente todo o leito é visualizado como sendo uma sequência de n leitos de espessura L e porosidade ε_i , cada um composto com fibras de diâmetro d_{fi} como mostra a Figura 2.11.

A porosidade ε_i do leito composto pelas fibras d_{fi} pode ser facilmente correlacionada à porosidade do filtro ε pela seguinte equação:

$$\varepsilon_i = 1 - (1 - \varepsilon)x_i \quad (2.58)$$

onde x_i é a fração das fibras do filtro com diâmetro d_{fi} , dado por:

$$x_i = \frac{n_i d_{fi}}{\sum n_i d_{fi}} \quad (2.59)$$

onde n_i é o número de fibras com um determinado diâmetro d_{fi} na faixa de tamanho i .

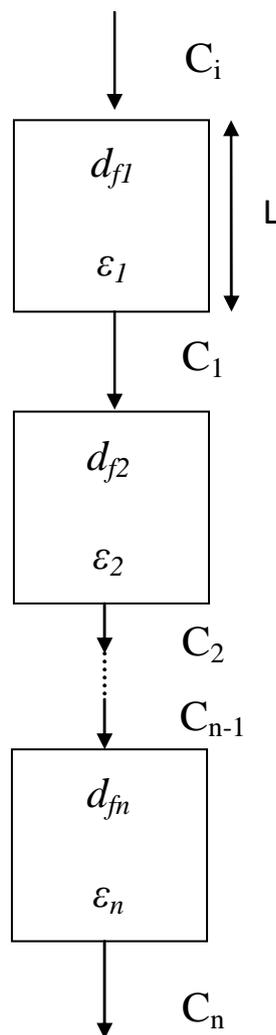


Figura 2.11: Sequência de filtros.

Para cada um destes n leitos de filtro, a penetração das partículas P_n , pode ser definida como sendo:

$$P_1 = \frac{C_1}{C_i} = \exp \left[- \frac{4L(1 - \varepsilon_1)\eta_{t1}}{\pi \varepsilon_1 d_{f1}} \right] \quad (2.60)$$

$$P_2 = \frac{C_2}{C_1} = \exp \left[- \frac{4L(1 - \varepsilon_2)\eta_{t2}}{\pi \varepsilon_2 d_{f2}} \right] \quad (2.61)$$

$$\begin{array}{c} \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ P_m = \frac{C_o}{C_{n-1}} = \exp \left[- \frac{4L(1 - \varepsilon_n)\eta_m}{\pi \varepsilon_n d_{fn}} \right] \end{array} \quad (2.62)$$

Por definição, a penetração total das partículas por meio do filtro é dada por:

$$P_n = \frac{C_o}{C_i} \quad (2.63)$$

Mas, das Equações (2.60) a (2.62), é possível observar que:

$$P_1 \times P_2 \times P_3 \times \dots \times P_m = \frac{C_1}{C_i} \times \frac{C_2}{C_1} \times \frac{C_3}{C_2} \times \dots \times \frac{C_o}{C_{n-1}} = \frac{C_o}{C_i} \quad (2.64)$$

Portanto a penetração total P pode ser dada como:

$$P = P_1 \times P_2 \times P_3 \times \dots \times P_m \quad (2.66)$$

Substituindo as Equações. (2.60) a (2.62) na Equação (2.65) temos P_n como sendo:

$$P_n = \exp \left[- \frac{4L}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{ii}}{\varepsilon_i d_{fi}} \right] \quad (2.66)$$

Conseqüentemente, a eficiência total do filtro para uma distribuição de fibras pode ser escrita como:

$$E = 1 - P_n = 1 - \exp \left[- \frac{4L}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{ii}}{\varepsilon_i d_{fi}} \right] \quad (2.67)$$

Um trabalho que envolve a eficiência de coleta de partículas com o efeito da pressão foi realizado por Sambaer et al., (2011). Em tal estudo, os autores simularam o efeito da pressão do ar na eficiência nos filtros de poliuretano com nanofibras. Eles observaram que o aumento da pressão de ar diminuiu a eficiência de coleta dos filtros para partículas menores que 200 nm, devido ao aumento da força de arraste e diminuição da intensidade do movimento Browniano.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão descritos as principais características do material particulado e dos meios filtrantes, assim como os procedimentos adotados nos ensaios de permeação, de filtração, da porosidade da torta e da eficiência de coleta de partículas.

3.1 Material particulado

A rocha fosfática foi utilizada nos ensaios de filtração a alta pressão, devido ao domínio já adquirido em diversos trabalhos de filtrações de gases realizados em pressão atmosférica no Departamento de Engenharia Química da UFSCar.

O diâmetro médio volumétrico e o diâmetro médio geométrico foram obtidos no equipamento Malvern Mastersizer Microplus (MAF 5001) do departamento de Engenharia Química da UFSCar. O diâmetro médio de Stokes foi adquirido a partir do equipamento Sedigraph 5000 ET Particle Size Analyzer (Micromeritics) do departamento de Engenharia de Materiais-UFSCar. A densidade da partícula foi obtida utilizando-se um Picnômetro digital de Hélio - Micromeritics (Accupyc 1330). A esfericidade da partícula foi determinada a partir da análise de imagens através do programa Image-Pro Plus 7.0 e pela seguinte equação:

$$\phi = \frac{4\pi A_p}{P_{er}^2} \quad (3.1)$$

em que ϕ representa a esfericidade, A_p a área projetada e P_{er} o perímetro da partícula (ULUSOY, 2008). O desvio geométrico (σ_g) foi determinado pela razão entre os diâmetros das partículas $d_{p84,13}/d_{p50}$ da curva da distribuição granulométrica. O valor do diâmetro $d_{p84,13}$

foi obtido na abscissa diretamente na curva cumulativa para um valor de 84,13% na ordenada. Interpreta-se, desse modo, que 84,13% das partículas da amostra possuem diâmetro abaixo desse valor. De forma análoga foi encontrado o valor para d_{p50} . As principais características da rocha fosfática estão apresentadas na Tabela 3.1.

Uma imagem de uma amostra de partículas de rocha fosfática, gerada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV/Philips XL 30 FEG), pode ser visualizada na Figura 3.1 e sua distribuição granulométrica, em base volumétrica, na Figura 3.2.

Tabela 3.1: Caracterização do material particulado.

Caracterização	Material Particulado
	Rocha Fosfática
Densidade (kg/m^3)	3170
Esfericidade	0,61
Diâmetro médio Volumétrico (μm)	10,5
Diâmetro médio Geométrico (μm)	5,2
Diâmetro médio de Stokes (μm)	3,0
Desvio geométrico (σ_g)	2,1

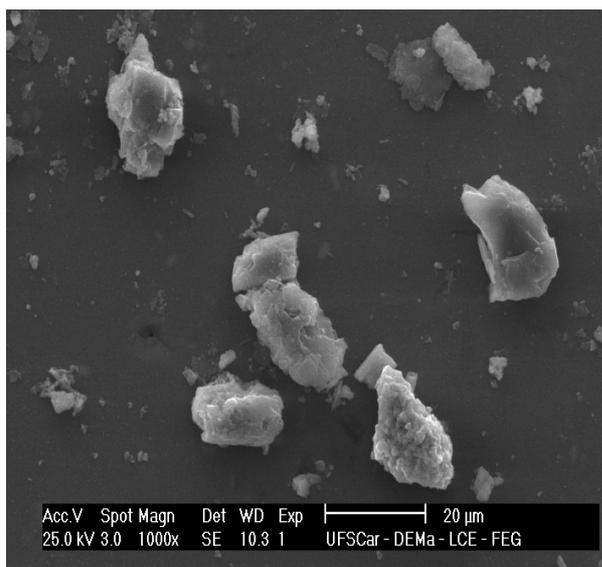


Figura 3.1: Imagem da superfície das partículas de rocha fosfática.

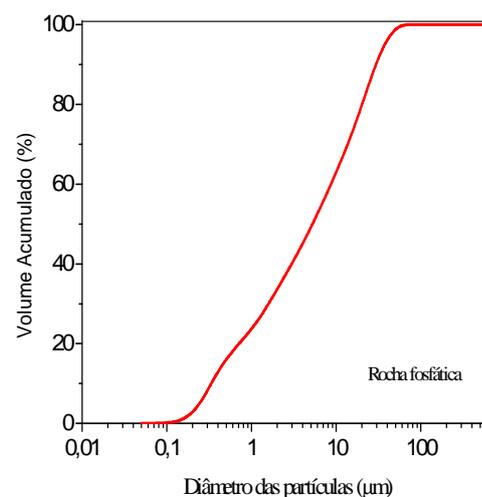


Figura 3.2: Distribuição granulométrica das partículas de rocha fosfática.

Observa-se na Figura 3.1, que o formato das partículas de rocha fosfática são irregulares. Isto pode ser comprovado através do cálculo da esfericidade pela Equação (3.1), sendo o valor encontrado de 0,61.

3.2 Meios filtrantes

Os meios filtrantes utilizados nos experimentos foram o poliéster (PT), o polipropileno (PP), ambos fornecidos comercialmente pela Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros Ltda, a celulose (Cel), cedida pela Ahlstrom Brasil Indústria e Comércio de Papéis Especiais Ltda e a tela metálica (Met), adquirida pela Apexfil Indústria e Comércio Ltda. A área efetiva ao escoamento foi de 44 cm², relativa para um diâmetro útil de 7,5 cm. A escolha dos meios filtrantes de celulose e metálico foi devido a sua grande aplicabilidade nos sistemas de filtração de gás natural. Porém, ensaios com os filtros de tecidos (poliéster e polipropileno) também foram realizados para observar se os mesmos poderiam ser aplicados como alternativa na filtração de gás natural.

As principais características e propriedades físicas dos meios filtrantes estão descritas na Tabela 3.2. O diâmetro das fibras (d_f) e a porosidade superficial (ϵ_s) dos filtros foram determinados experimentalmente pela análise das imagens das superfícies dos filtros geradas no MEV e analisados no programa Image-Pro Plus 7.0. A gramatura e a espessura (L) foram fornecidas pelo fabricante. A densidade de empacotamento dos filtros (α) foi calculada baseada em termos da gramatura, da densidade das fibras e a da espessura do filtro (DONAVAN, 1985). A porosidade volumétrica (ϵ) foi obtida por $\epsilon = 1 - \alpha$. Na Figura 3.3 estão apresentadas as diferentes superfícies dos meios filtrantes geradas no MEV.

Na Tabela 3.2 verifica-se que a densidade de empacotamento α das membranas poliméricas encontra-se na faixa de 0,18 a 0,25, sendo classificados como filtros de tecidos.

A alta densidade de empacotamento ($\alpha = 0,45$) e a pequena espessura ($L = 0,15$ mm) do filtro metálico podem ser explicadas pela estrutura monocamada do meio filtrante, baseada no trançamento diagonal padrão Holândes (Dutch Twilled Weave Pattern), caracterizada por um conjunto de fios de trama o mais próximo possível, no qual cada fio da trama passa por cima e por baixo do urdume, como mostra a Figura 3.3-d.

Tabela 3.2: Caracterização dos meios filtrantes.

Meio Filtrante	Poliéster	Polipropileno	Celulose	Metálico
*Contextura	Feltro	Feltro	Feltro	Trançado
*Gramatura (g/cm^2)	550	600	150	535
*Espessura (L) (mm)	2,2	2,6	0,45	0,15
**Diâmetro das fibras (d_f) (μm)	26	25	22	28
*Densidade das fibras, ρ_f (kg/m^3)	1380	908	1500	7850
**Porosidade superficial, ε_s (-)	0,80	0,76	0,74	0,30
***Porosidade volumétrica, ε (-)	0,82	0,75	0,78	0,55
***Densidade de empacotamento, α (-)	0,18	0,25	0,22	0,45

*Fabricante e literatura ** Imagem da superfície do filtro *** calculado

A distribuição aleatória das fibras típicas em filtros não trançados (poliéster, polipropileno e celulose) foi verificada através das imagens apresentadas nas Figuras 3.3-a a 3.3-c. As regiões de fusões na superfície das fibras são perceptíveis nos polímeros sintéticos (Poliéster e Polipropileno). Isto indica que estes tecidos receberam tratamentos específicos como a chamuscagem e a calandragem para dificultar a inserção das partículas no interior dos elementos filtrantes. Este tratamento aumenta o tempo de vida útil (TANABE, 2008). Para o

meio filtrante de celulose nota-se um tratamento semelhante na sua superfície, porém de forma mais uniforme que o observado para os meios filtrantes de fibras sintéticas.

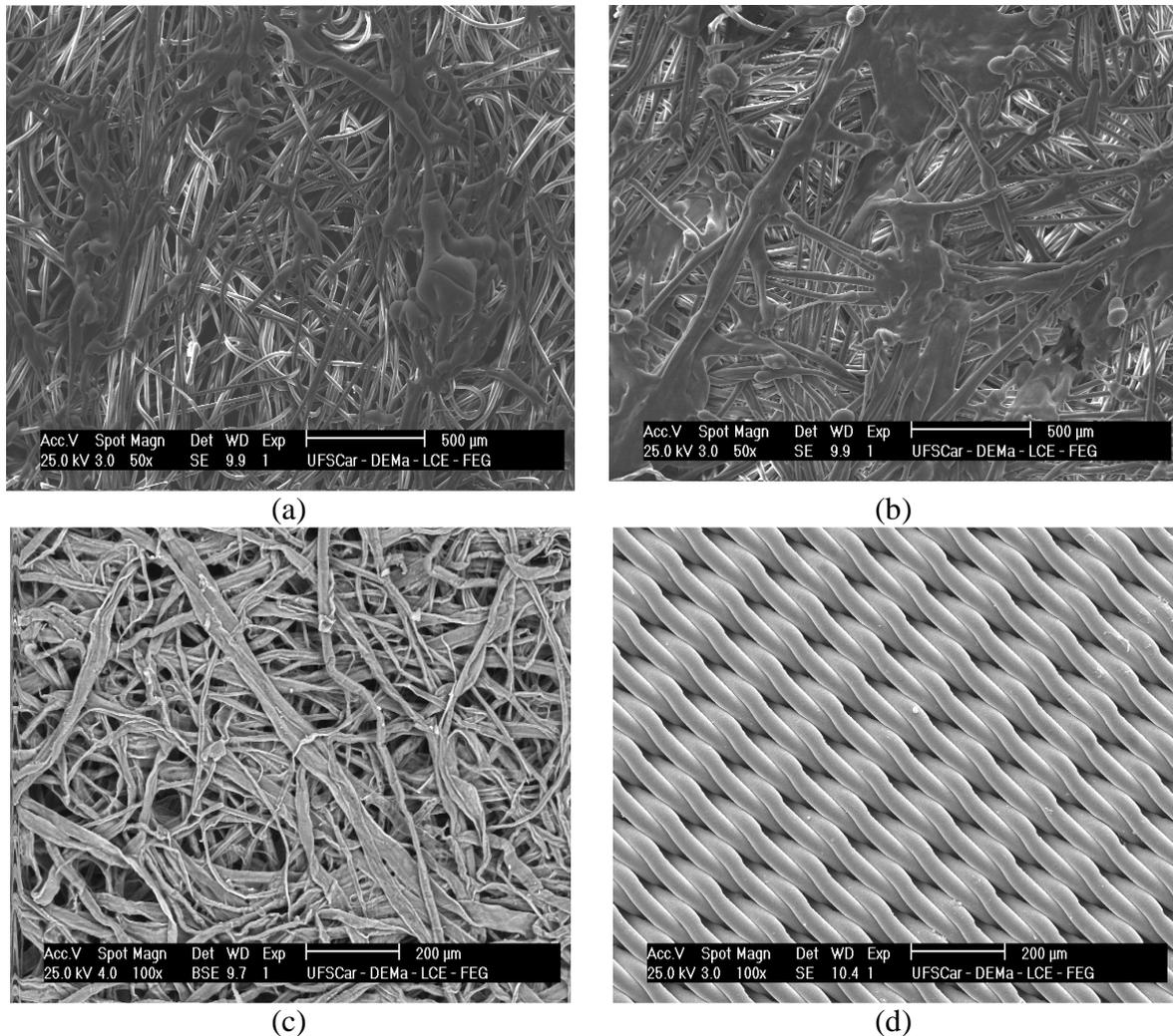


Figura 3.3: Imagens das superfícies dos meios filtrantes a) poliéster, b) polipropileno, c) celulose e d) metálico, geradas no MEV.

3.3 Equipamento de filtração

O equipamento utilizado nos ensaios de filtração era constituído por: compressor de alta pressão ligado a três filtros para limpeza do ar, secador de ar, alimentador de pó do tipo rosca, filtro absoluto, sistema de filtração, rotâmetro e contador de partículas, acoplado a um sistema de aquisição de dados. O esquema do equipamento está ilustrado na Figura 3.4.

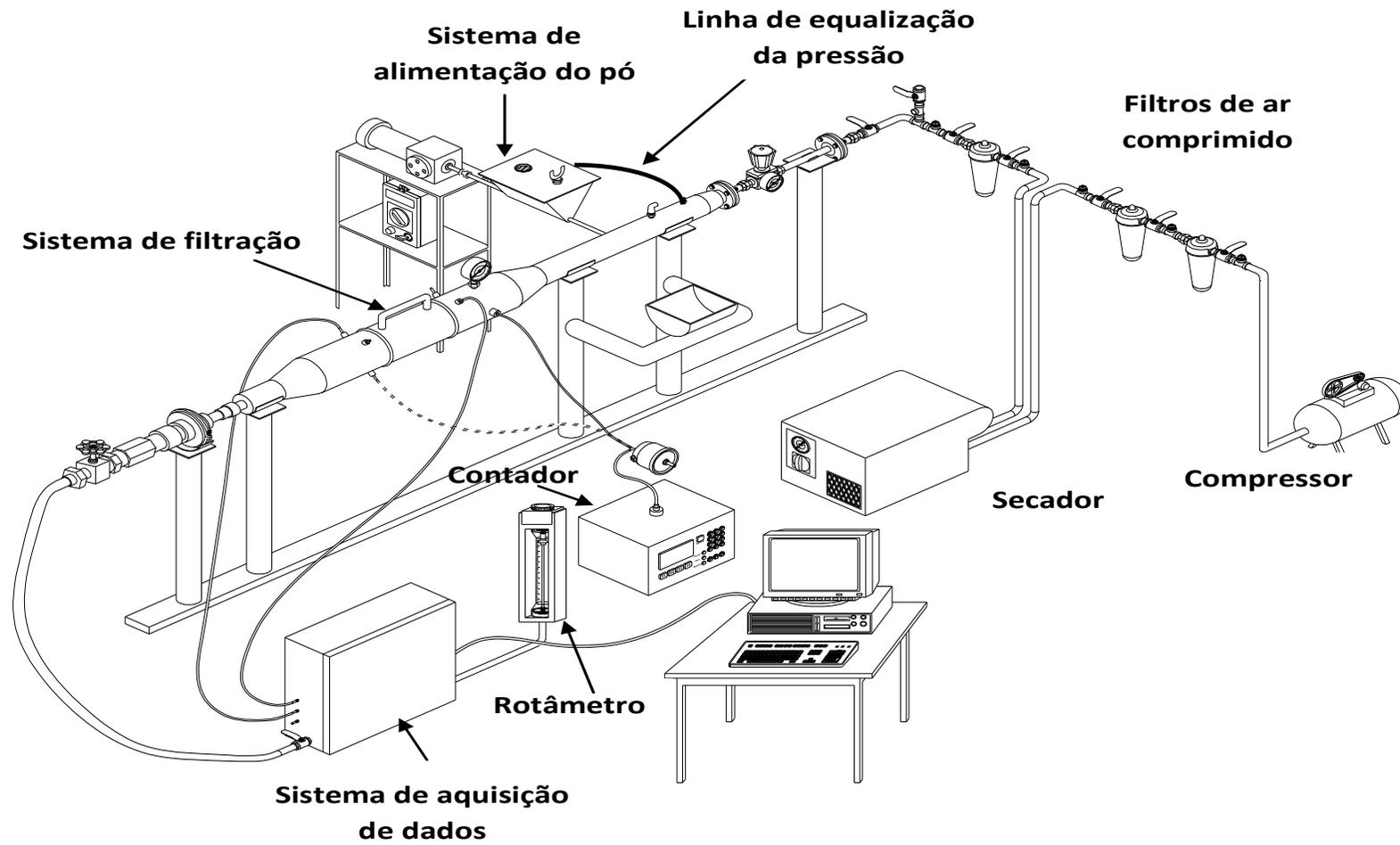


Figura 3.4: Equipamento de filtração a alta pressão.

3.3.1 Sistema de ar comprimido

A montagem do compressor e o sistema de limpeza do ar comprimido da linha, constituído por três filtros coalescentes e por um secador, estão apresentados na Figura 3.5.

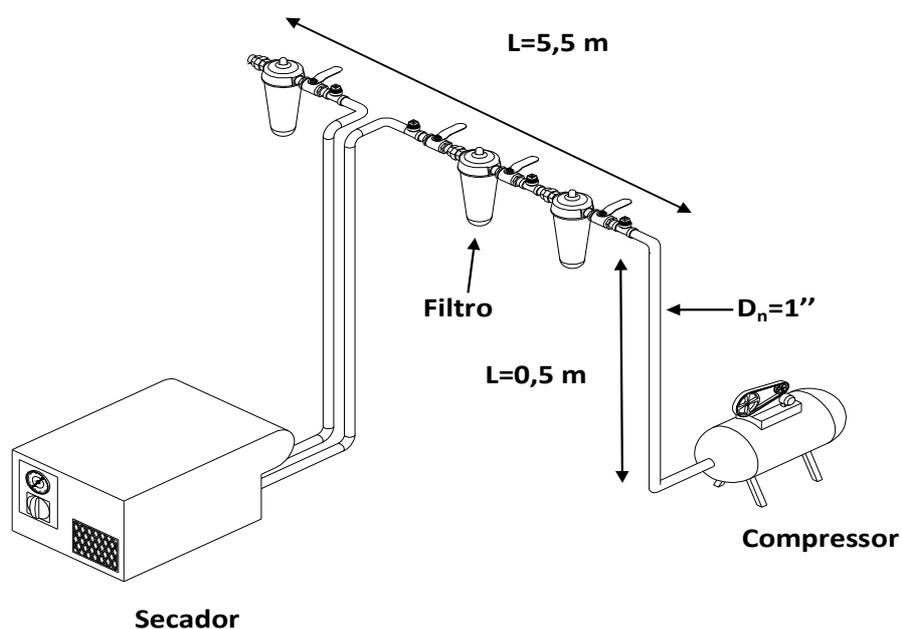


Figura 3.5: Ilustração do sistema de limpeza do ar comprimido.

O compressor de ar utilizado nos ensaios é da marca Atlas Copco, modelo LT2-155 90TM. Este compressor é do tipo pistão e trabalha com pressão máxima de operação de 15 bar e vazão de ar de 3,6 l/s. Apesar, de o compressor apresentar baixo teor de óleo, pode haver a possibilidade de arraste de partículas sólidas e líquidas provenientes do ambiente e do compressor. Por esta razão foi instalado um conjunto de filtros coalescentes que garantisse que o ar utilizado nos experimentos fosse isento de qualquer tipo de resíduos.

Além dos filtros foi instalado um secador da marca Atlas Copco, modelo FX2, no qual utiliza um sistema de refrigeração, para garantir que todo o ar utilizado nos experimentos

apresentasse uma umidade de aproximadamente 30%. O secador operava em condições de pressão máxima de entrada de 13 bar e de vazão de ar de 10 l/s.

3.3.2 Sistema de alimentação do material particulado

O alimentador de partículas era constituído basicamente por: um compartimento de armazenamento de pó, acoplado a uma rosca sem fim e conectado a um motor (potência de 1Hp, RPM 3600 e redutor RPM 4), onde o pó era alimentado na corrente gasosa. Este compartimento continha um orifício na parte superior, para inserção do pó e uma linha de equalização que ajustava a pressão da bancada com o do compartimento, para que todo o sistema permanecesse na mesma pressão, durante toda a operação de filtração.

O pó alimentado na corrente gasosa foi controlado por meio de um variador de velocidade, no qual foi possível ajustar a concentração de pó desejada durante os ensaios de filtração. A Figura 3.6 ilustra o alimentador de partículas.

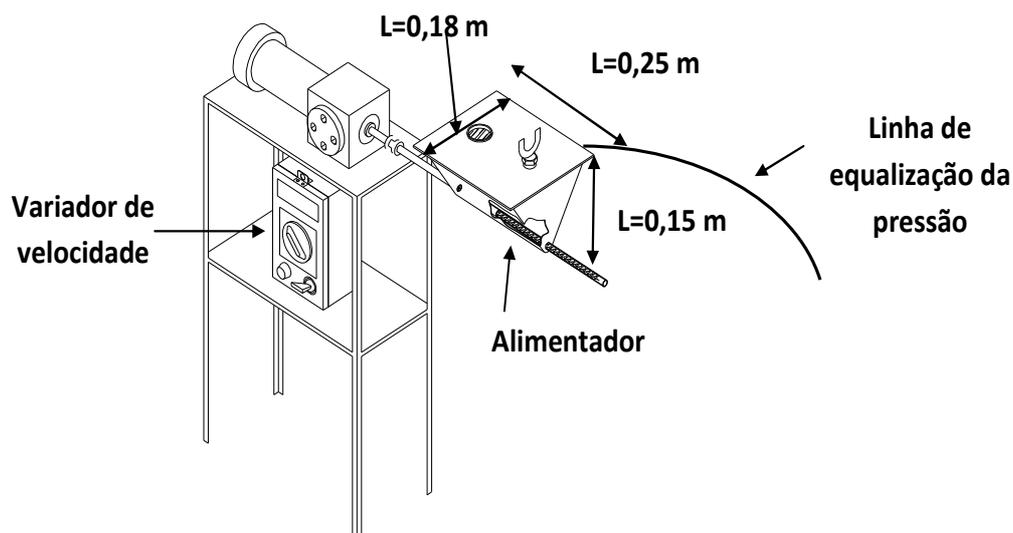


Figura 3.6: Ilustração do alimentador de partículas do tipo rosca.

3.3.3 Sistema de filtração

O sistema de filtração utilizado nos experimentos era composto por uma tela metálica de 10 mesh no seu interior, que servia apenas como um suporte para o meio filtrante. Isto evitava que ocorresse deformações no elemento filtrante, devido ao aumento da velocidade superficial do gás. A fixação do meio filtrante no sistema de filtração foi realizada por um anel com sistema de rosqueamento.

A fixação do sistema de filtração na bancada era feita por engates tipo clamp, que eram rápidos e precisos na instalação, suportados com juntas de vedações tipo silicone com encaixes perfeitos que garantiu a perfeita fixação e vedação do sistema. A Figura 3.7 apresenta a ilustração do sistema de filtração.

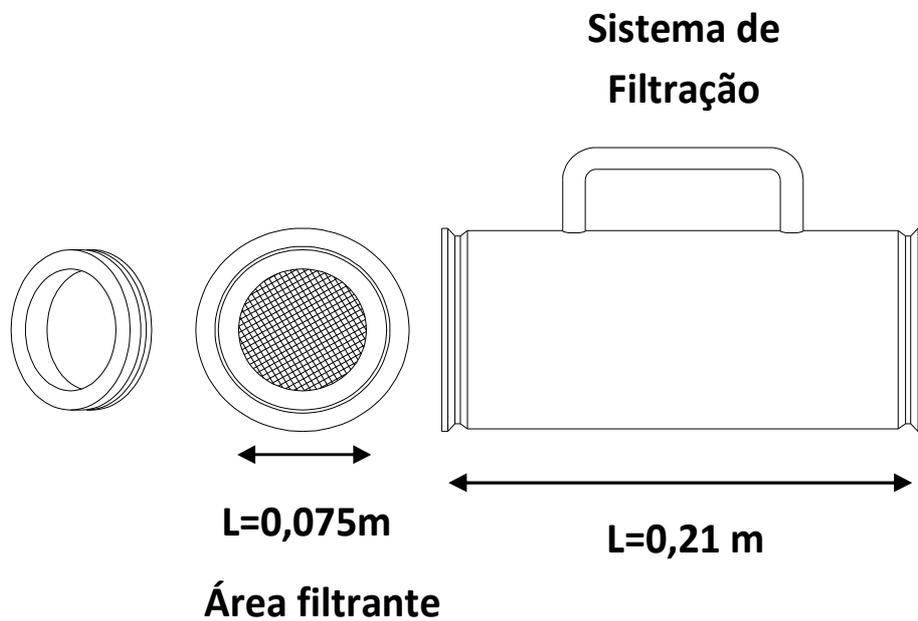


Figura 3.7: Ilustração do sistema de filtração.

3.3.4 Sistema de Aquisição de dados

Um transmissor de pressão diferencial da marca NOVUS, modelo 692 era responsável pela aquisição dos dados de perdas de cargas diferenciais no meio filtrante. A condição máxima de operação do sensor era de 100 mbar com precisão de 0,5% na escala de fundo.

O software utilizado para registrar todas as medidas durante os experimentos foi desenvolvido e instalado pela empresa TS equipamentos. Na Figura 3.8 está ilustrado um esquema do sistema de aquisição de dados.

A medida da vazão volumétrica foi realizada por meio de um rotâmetro da marca Key Instruments série FR 4500 e modelo 4A72.

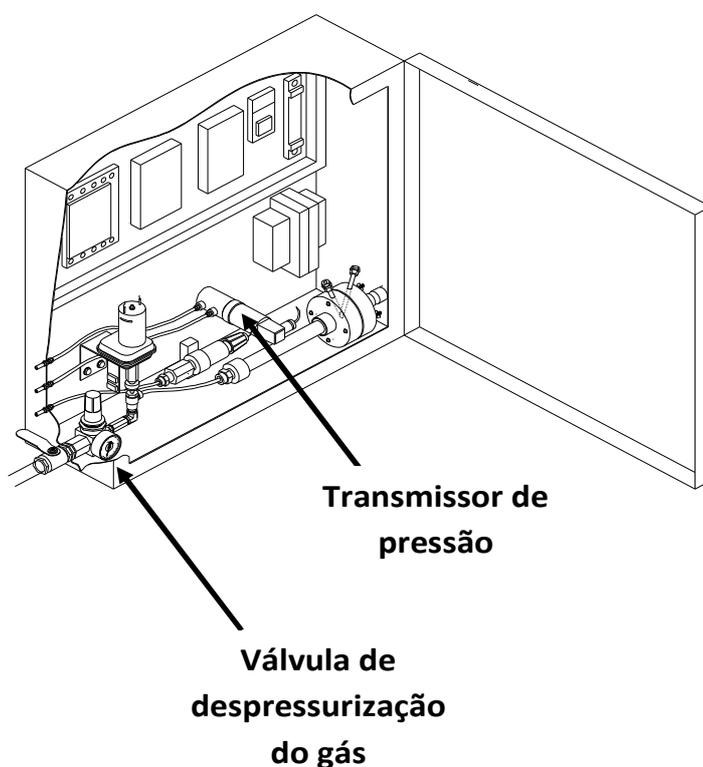


Figura 3.8: Ilustração do sistema de aquisição de dados.

3.3.5 Contador de partículas

O contador de partículas utilizado para nos ensaios experimentais foi o modelo Abakus Mobil Air, com o sensor LDS 328s da marca Klotz. A faixa de análise das partículas avaliadas pelo contador era de 0,3 μm a 20 μm , com uma concentração máxima de 2.000.000 partículas/l. A Figura 3.9 apresenta a ilustração do contador de partículas.

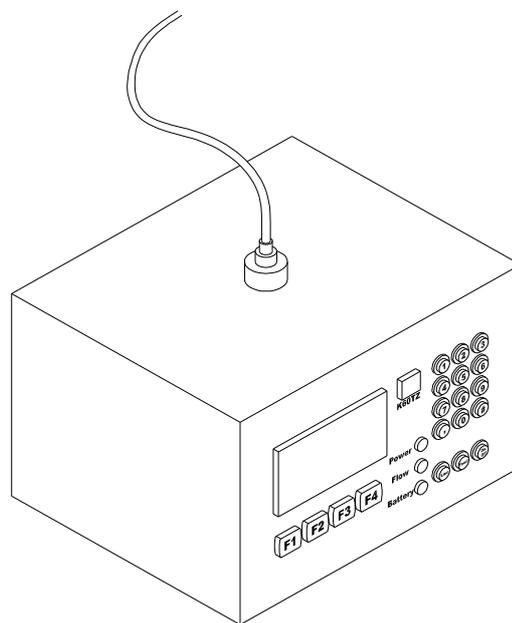


Figura 3.9: Ilustração do contador de partículas.

3.4 Procedimento experimental

A seguir serão descritos os procedimentos para a realização dos experimentos de permeabilidade, de filtração, da porosidade experimental da torta e da eficiência de coleta de partículas.

3.4.1 Permeabilidade experimental do meio filtrante

A avaliação da permeabilidade foi realizada variando-se a pressão absoluta do sistema de 93 kPa a 693 kPa e vazões volumétricas entre 14 l/min até 74 l/min, na ausência de material particulado. Estes limites de valores foram estabelecidos devido a limitações impostas pelo equipamento de filtração. Os meios filtrantes utilizados nos experimentos apresentavam uma área circular de 44 cm², relativo a um diâmetro do filtro de 7,5 cm. A escolha do ar comprimido como fluido gasoso foi devido ao seu menor custo e também por questões de segurança (gás não inflamável).

Os valores da perda de carga (ΔP) foram medidos por meio de um transdutor de pressão (Marca Novus) e registrados em função da vazão volumétrica (Q_v) medidos por meio de um rotâmetro (Marca Key Instruments), sendo convertidos para velocidade superficial por $v_s = Q_v/A_f$. Todas as vazões volumétricas do ar foram obtidas nas condições locais de temperatura e pressão ($T \approx 25^\circ\text{C}$, $P_{\text{atm}} = 700\text{mmHg}$, $\mu \approx 1.86 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$, $\rho \approx 1.11 \text{ kg/m}^3$) e o ajuste da velocidade superficial local no filtro com a variação da pressão absoluta do sistema foi determinado utilizando a lei dos gases ideais como mostra a equação:

$$v_s(T, P) = v_{s0} \frac{T}{T_R} \frac{P_R}{P} \quad (3.2)$$

sendo v_s a velocidade superficial do gás nas condições de temperatura e pressão de interesse; v_{s0} a velocidade do gás na temperatura (T_R) e pressão (P_R) de referência.

No caso da viscosidade do gás, o efeito da alta pressão do gás foi aumentar a viscosidade. Porém, para pressões menores que 1500 psia (10340 kPa) este efeito pode ser desprezado, mas nas aplicações a altas pressões a viscosidade pode ser aumentada de 2 a 5 vezes, dependendo da temperatura do gás (MILLER, 1996).

Os conjuntos de valores coletados ($\Delta P \times v_s$) foram tratados de acordo com o método dos mínimos quadrados utilizando um modelo parabólico do tipo $y = ax + bx^2$, no qual y é ΔP e x é a velocidade na saída do filtro (v_s). Os parâmetros de permeabilidade k_1 e k_2 da Equação de Forchheimer (Equação 2.21) foram calculados através das constantes a e b , respectivamente por $k_1 = \mu/a$ e $k_2 = \rho/b$. Para cada elemento filtrante foi realizado três experimentos de permeação, sendo então realizada a média dos coeficientes de permeabilidade k_1 e k_2 .

3.4.2 Simulação da permeação com gás natural

Após a determinação dos parâmetros de permeabilidade k_1 e k_2 obtidos experimentalmente, simulações foram desenvolvidas para prever a perda de carga no filtro operando com gás natural às pressões de 100 kPa até 5000 kPa (5 MPa) (INNOCENTINI et al., 2011).

Para este propósito, a geometria do meio filtrante utilizado para as simulações foi a de um cilindro vazado com fluxo radial (aplicados na filtração de gás natural). A Equação de Forchheimer utilizada para determinar a perda de carga no filtro foi a Equação (2.22). A altura H e o diâmetro externo D_e foram fixados respectivamente em 0,50 m e 0,28 m, o qual resultou em uma área externa $A_e=0,44 \text{ m}^2$. O diâmetro interno do filtro D_i foi calculado por $D_i = D_e - 2L$ com base na espessura de cada elemento filtrante apresentado na Tabela 3.2.

A composição molar do gás natural utilizada para o cálculo do fator de compressibilidade (Z_o), da densidade do gás (ρ_o) e da viscosidade do gás (μ_o) está apresentada na Tabela 3.3 (GÁSBRAZILIANO, 2011).

Tabela 3.3: Composição molar do gás natural usado na simulação.

Componentes	Massa molar (g/mol)	Fração molar, y_i (%)
Metano (CH ₄)	16,042	91,80
Etano (C ₂ H ₆)	30,07	5,58
Propano (C ₃ H ₈)	44,1	0,97
Butano (C ₄ H ₁₀)	58,12	0,05
Petano (C ₅ H ₁₂)	72,15	0,10
Dióxido de carbono (CO ₂)	44,01	0,08
Nitrogênio (N ₂)	28,13	1,42
<i>Massa molar média, MM_a (g/mol)</i>	<i>17,366</i>	

A densidade do gás natural (ρ_o) estimada para os cálculos foi baseada na pressão absoluta (P_o) e a temperatura (T_o) de saída do filtro, apresentado como (DELMÉE, 2003):

$$\rho_o = \frac{P_o MM_a}{Z_o R T_o} \quad (3.3)$$

em que MM_a é a massa molar do gás e R' é a constante universal dos gases (8,314 Pa.m³/mol.K).

O fator de compressibilidade (Z_o) e a viscosidade (μ_o) do gás natural foram estimados a partir das correlações empíricas, propostas por Heidaryan et al., (2010):

$$Z_o = \ln \left(\frac{A_1 + A_3 \ln(P_{Pr}) + \frac{A_5}{T_{Pr}} + A_7 (\ln(P_{Pr}))^2 + \frac{A_9}{T_{Pr}^2} + \frac{A_{11}}{T_{Pr}} \ln(P_{Pr})}{1 + A_2 \ln(P_{Pr}) + \frac{A_4}{T_{Pr}} + A_6 (\ln(P_{Pr}))^2 + \frac{A_8}{T_{Pr}^2} + \frac{A_{10}}{T_{Pr}} \ln(P_{Pr})} \right) \quad (3.4)$$

em que A_1 a A_{11} são os coeficientes encontrados na Tabela 3.4, enquanto P_{Pr} e T_{Pr} são, respectivamente a pressão pseudo reduzida e a temperatura pseudo reduzida, calculados por:

$$T_{Pr} = \frac{T_o}{\sum_{i=1}^n y_i T_{Ci}} \quad (3.5)$$

$$P_{Pr} = \frac{P_o}{\sum_{i=1}^n y_i P_{Ci}} \quad (3.6)$$

sendo T_o e P_o são a pressão absoluta e a temperatura do gás na saída do filtro, y_i é a fração molar, T_{Ci} é a temperatura crítica e P_{Ci} é a pressão crítica para cada componente i do gás natural.

Tabela 3.4: Coeficientes utilizados na Equação (3.4).

Coeficiente	Coeficiente ajustado $0,2 \leq P_{Pr} \leq 3$	Coeficiente ajustado $3 < P_{Pr} \leq 15$
A_1	$2,827793 \times 10^{+00}$	$3,252838 \times 10^{+00}$
A_2	$-4,688191 \times 10^{-01}$	$-1,306424 \times 10^{-01}$
A_3	$-1,262288 \times 10^{+00}$	$-6,449194 \times 10^{-01}$
A_4	$-1,536524 \times 10^{+00}$	$-1,518028 \times 10^{+00}$
A_5	$-4,535045 \times 10^{+00}$	$-5,391019 \times 10^{+00}$
A_6	$6,895104 \times 10^{-02}$	$-1,379588 \times 10^{-02}$
A_7	$1,903869 \times 10^{-01}$	$6,600633 \times 10^{-02}$
A_8	$6,200089 \times 10^{-01}$	$6,120783 \times 10^{-01}$
A_9	$1,838479 \times 10^{+00}$	$2,317431 \times 10^{+00}$
A_{10}	$4,052367 \times 10^{-01}$	$1,632223 \times 10^{-01}$
A_{11}	$1,073574 \times 10^{+00}$	$5,660595 \times 10^{-01}$

A viscosidade do gás natural foi calculada como uma função da temperatura e da pressão de acordo com o modelo empírico proposto por Heidaryan et al., (2010).

$$\mu_o = \ln \left(\frac{B_1 + B_2 \left(\frac{MM_a}{T_o} \right) + B_3 \left(\frac{MM_a}{T_o} \right)^2 + B_4 \rho_o + B_5 \rho_o^2 + B_6 \rho_o^3}{1 + B_7 \left(\frac{MM_a}{T_o} \right) + B_8 \left(\frac{MM_a}{T_o} \right)^2 + B_9 \left(\frac{MM_a}{T_o} \right)^3 + B_{10} \rho_o} \right) \quad (3.7)$$

na qual ρ_o é a densidade do gás em P_o e T_o (°F), MM_a é a média da massa molar do gás e B_1 a B_{10} são as constantes empíricas fornecidas pela Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Coeficientes utilizados na Equação (3.7).

Coeficiente	Coeficientes ajustados
B_1	$1,022872 \times 10^{+00}$
B_2	$-1,651432 \times 10^{+00}$
B_3	$5,757386 \times 10^{+00}$
B_4	$-7,389282 \times 10^{+00}$
B_5	$8,389065 \times 10^{+00}$
B_6	$2,977476 \times 10^{+00}$
B_7	$-1,451318 \times 10^{+00}$
B_8	$4,682506 \times 10^{+00}$
B_9	$1,918239 \times 10^{+00}$
B_{10}	$-9,844968 \times 10^{+00}$

3.4.3 Ensaios de filtração

3.4.3.1 Perda de carga

Na obtenção das curvas de perda de carga no meio filtrante, adicionou-se o material particulado (rocha fosfática) no compartimento de armazenamento para sua inserção na corrente gasosa por meio de uma rosca sem fim acoplada a um motor. A vazão mássica de pó na corrente gasosa foi controlada por um variador de velocidade e fixada em 0,005 g/s.

A velocidade superficial de filtração utilizada nos experimentos foi fixada em 0,05 m/s

para todos os experimentos, e as pressões absolutas do sistema variadas em 193, 393 e 693 kPa. Estes valores foram determinados devido a algumas limitações impostas pelo equipamento. A perda de carga (ΔP) máxima admitida nos quatro meios filtrantes foi estabelecida em 1100 Pa. Este valor (ΔP) foi previamente estipulado uma vez que o meio filtrante era disposto em uma posição vertical, as quais tortas muito espessas poderiam levar a desestruturação na hora da retirada do equipamento.

Os valores da perda de carga (ΔP), do tempo de filtração (t) e da pressão do sistema foram registrados durante os experimentos pelo sistema de aquisição de dados da TS equipamentos. Estes conjuntos de valores de perda de carga foram posteriormente plotados em função da massa de pó depositada por unidade de área W (kg/m^2). A utilização de W para representação das curvas de filtração é uma forma de padronização dos gráficos, porque se as curvas forem plotadas em função do tempo, poderão existir diferentes tempos de filtração para um mesmo W , sendo (t) dependente da concentração de alimentação de pó.

Para cada experimento realizado, os meios filtrantes foram pesados antes e depois da filtração em uma balança da marca Shimazu, modelo AY 220, para verificar a quantidade de massa de pó coletada pelo filtro.

3.4.3.2 Porosidade experimental da torta

Após o término dos ensaios, os filtros passaram por algumas etapas de tratamento para possibilitar a análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Inicialmente, o filtro era submetido a um fluxo de vapor adesivo Loctite 416, para fixar as partículas nas fibras, em um período de 24 hs. Em seguida, o filtro foi colocado sobre uma esponja encharcada com resina PMS 10-Henkel e levado para ser endurecido em uma estufa a 60 °C, por um período de 48 hs. Posteriormente, esse filtro era cortado, em pedaços

de 1,0 x 1,0 cm, e embutido em uma resina de poliéster Fiberglass 10249. Por fim, as amostras foram lixadas e polidas, para obtenção das imagens no MEV. Maiores detalhes deste tratamento podem ser obtidos no trabalho de Aguiar e Coury (1996).

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram as imagens das tortas de filtração geradas no MEV. Estas imagens foram analisadas através do programa Image-Pro Plus 7.0. Neste programa utilizou-se um recurso de binarização de imagens, para transformar a imagem real em apenas dois níveis de cores: pontos claros (as partículas) e os pontos escuros (espaços vazios). Com a área de cada ponto quantificada foi possível então determinar a porosidade experimental da torta para cada pressão do sistema utilizada.

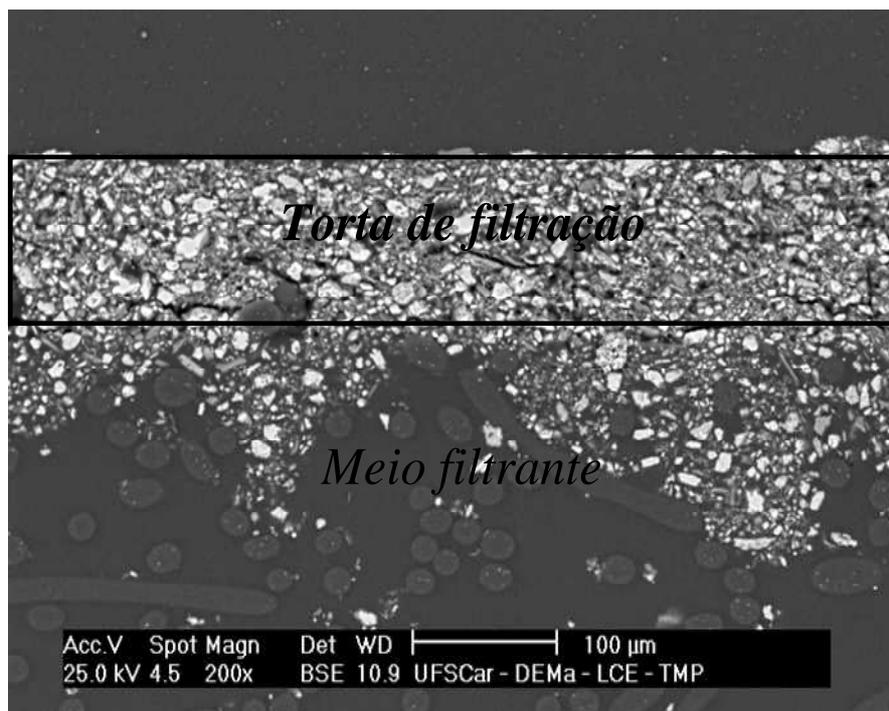


Figura 3.10: Imagem da torta-tecido gerada no MEV.

3.4.3.3 Eficiência de coleta das partículas

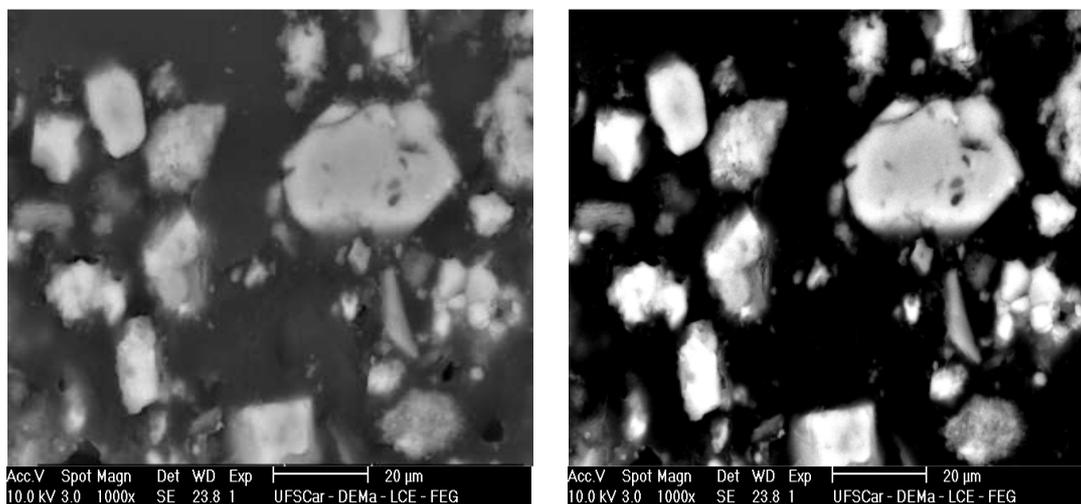
As eficiências de coleta de partículas (Eficiência fracionária) foram determinadas nas

mesmas condições dos ensaios de filtração ($v_s=0,05$ m/s e $P=193, 393$ e 693 kPa), porém a vazão mássica de pó alimentada na corrente gasosa foi menor ($\approx 0,0008$ g/s). Essa diminuição da vazão de pó em relação aos ensaios de filtração ocorreu devido à limitação da concentração de entrada de partículas no contador. As medidas das concentrações de partículas, antes e depois do filtro, foram realizadas sem a formação da torta de filtração utilizando um contador de partículas da marca Klotz, modelo Abakus Mobil Air.

As eficiências fracionárias, ou seja, as eficiências para cada faixa de tamanho das partículas foram obtidas como:

$$E(\%) = \left(\frac{C_i - C_o}{C_i} \right) \cdot 100 \quad (3.8)$$

na qual C_i e C_o referem-se as concentrações de partículas antes e após a passagem pelo meio filtrante, respectivamente.



(a)

(b)

Figura 3.11: Imagens da torta de filtração: a) Gerada no MEV e b) Binarizada no programa Image Pro Plus 7.0.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais da permeabilidade do filtro utilizando o ar comprimido, simulação da permeação do gás natural através do meio filtrante, obtenção das curvas de filtração, das porosidades da torta de filtração (experimental e teórica) e da eficiência de coleta das partículas (experimental e teórica).

Para a avaliação da permeação experimental dos filtros e os ensaios de filtração foram realizados testes com os meios filtrantes de poliéster, polipropileno, celulose e metálico (discos circulares com área filtrante de 44 cm²), utilizando o ar comprimido como o fluido gasoso. A utilização dos meios filtrantes de celulose e metálico foram devido à grande aplicabilidade dos mesmos na filtração de gás natural. Porém, filtros de tecidos (poliéster e polipropileno) também foram avaliados com intuito de encontrar alternativas de meios filtrantes que apresentassem desempenhos semelhantes aos filtros aplicados atualmente. A escolha do ar comprimido como fluido gasoso foi devido ao seu menor custo e também por questões de segurança (gás não inflamável). A rocha fosfática foi utilizada como material particulado nos ensaios de filtração a alta pressão, devido ao domínio já adquirido em diversos trabalhos de filtrações de gases realizados em pressão atmosférica no Departamento de Engenharia Química da UFSCar.

4.1 PERMEABILIDADE DO MEIO FILTRANTE

4.1.1 Permeabilidade experimental

Nos ensaios de permeação dos filtros foram realizados testes com os meios filtrantes de poliéster, polipropileno, celulose e metálico, utilizando o ar comprimido como o fluido gasoso e sem adição de qualquer material particulado.

As condições experimentais utilizadas neste estudo foram determinadas por testes preliminares. As velocidades superficiais (ajustadas) variaram de 0,01 a 0,21 m/s e as pressões absolutas do sistema de 93 kPa a 693 kPa. Estes valores foram determinados devido às limitações impostas pelo equipamento. Uma vez conhecida as condições operacionais foi possível obter os valores da perda de carga (ΔP) em função da vazão volumétrica (Q_v), sendo posteriormente convertidos para velocidade superficial por $v_s = Q_v/A_f$. Todas as vazões volumétricas do ar foram obtidas nas condições normais de temperatura e pressão e o ajuste da velocidade superficial no filtro (local) com a variação da pressão absoluta do sistema foi determinado assumindo a lei dos gases ideais conforme apresentada na Eq. (3.2).

Os comportamentos das curvas de perda de carga normalizada ($\Delta P/L$) em função da velocidade superficial local no filtro estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4 para os meios filtrantes de poliéster, de polipropileno, de celulose e metálico, respectivamente.

De acordo com as Figuras 4.1 a 4.4, pode-se constatar que, conforme o esperado, o aumento da velocidade superficial do gás proporcionou um acréscimo na perda de carga no elemento filtrante. Este aumento na perda de energia pelo aumento da velocidade é devido ao somatório das contribuições que coexistem entre o termo inercial e viscoso da Equação de Forchheimer (2.21).

Para baixas velocidades, a energia foi dissipada predominantemente pelo atrito entre as camadas do fluido (fricção do fluido). Esta perda de energia ($\Delta P/L$) é representada pelo termo linear da velocidade na Equação (2.21). Com o aumento da velocidade, no entanto, a mudança na direção do movimento e aceleração ou desaceleração do fluido causado pela mudança da trajetória do fluido intensificou a dissipação de energia. O aumento na dissipação permitiu um aumento da não linearidade da queda de pressão representada pelo termo quadrático da velocidade na Equação (2.21).

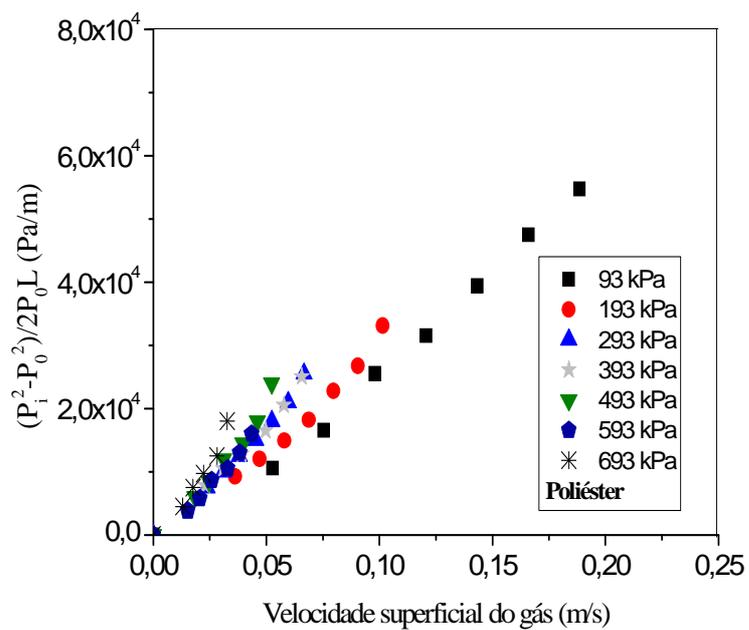


Figura 4.1: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de poliéster.

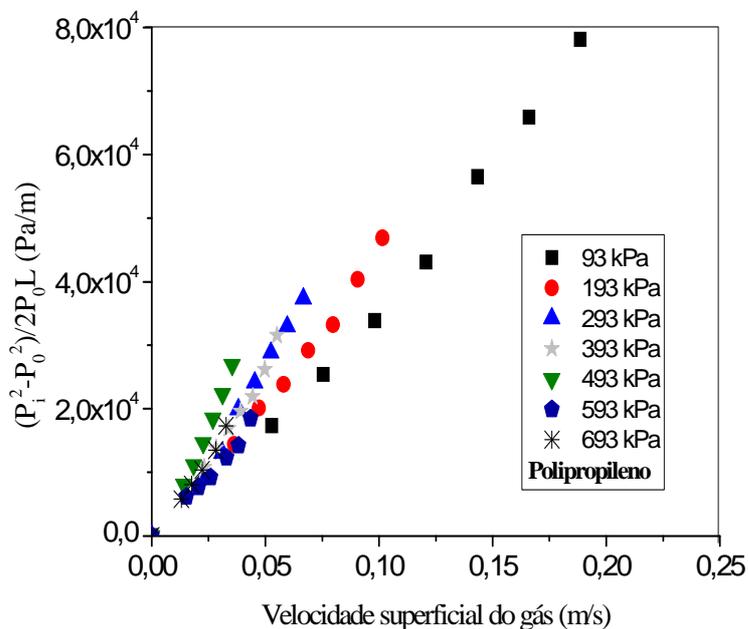


Figura 4.2: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de polipropileno.

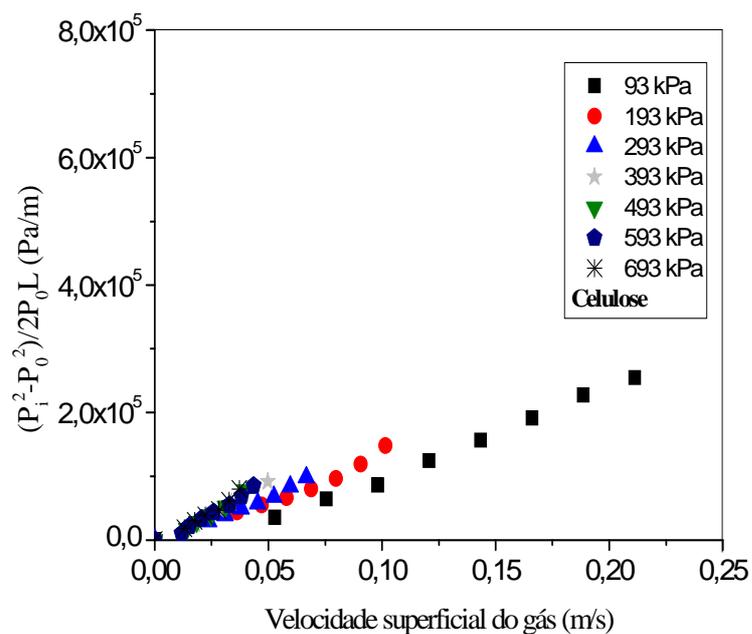


Figura 4.3: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de celulose.

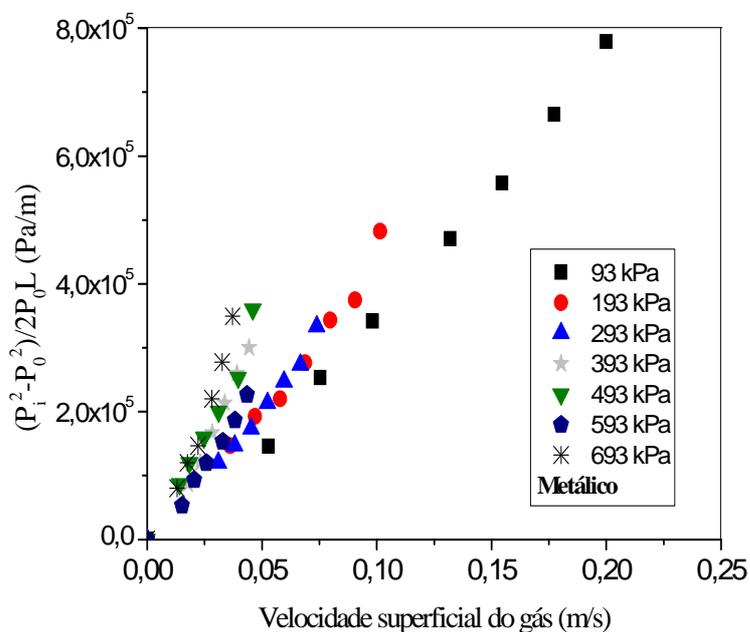


Figura 4.4: Curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro metálico.

Observa-se também nas Figuras 4.1 a 4.4 que para uma mesma velocidade superficial o aumento da pressão do sistema promoveu um aumento na perda de carga no filtro. Este comportamento pode estar, em princípio, relacionado com as mudanças nas propriedades do gás (μ e ρ) ou nas propriedades intrínsecas de permeabilidade do meio filtrante (k_1 e k_2).

Considerando as características do fluido, a viscosidade do ar não apresenta variações significativas com a pressão (< 2% para faixa de 10 a 2500 kPa) (KADOYA, et al., 1985). Por outro lado, considerando-se o ar como um gás ideal, a densidade varia linearmente com a pressão. Com isso, para as pressões do ar entre 93 kPa-693 kPa, a dissipação da energia viscosa na perda de carga é pouco afetada pelo termo linear ($\mu v_s/k_1$) da Equação de Forchheimer (2.21), porém a perda de energia inercial é intensificada proporcionalmente pelo termo quadrático ($\rho v_s^2/k_2$). Isto pode ajudar a explicar o aumento progressivo das curvas de $\Delta P/L$ com o aumento da pressão absoluta, conforme observado nas Figuras 4.1 a 4.4.

A outra hipótese da mudança da perda de carga com a pressão pode estar na mudança das propriedades intrínsecas de permeabilidade do meio filtrante (k_1 e k_2), baseada por três possíveis deformações: compressão de um único filamento, compressão do meio filtrante e deformação (alongamento) da superfície do filtro. A deformação de um único filamento é possível para fibras poliméricas ocas o qual o ar é aprisionado nas cavidades do núcleo. A deformação mecânica pode ser induzida por pressões diferenciais não estáticas através das membranas que podem modificar a forma da seção transversal. A deformação (alongamento) na superfície do filtro pode ocorrer quando um meio filtrante não suportado for submetido a altas vazões do gás com o aumento da porosidade superficial e da permeabilidade intrínseca.

Comparando as curvas de permeação para os quatro meios filtrantes (Figuras 4.1 a 4.4), a pressão normalizada decresce pela seguinte ordem: Metálico > Celulose > Polipropileno > Poliéster.

A partir do conjunto de valores obtidos experimentalmente ($\Delta P \times v_s$) foram realizados ajustes das curvas de permeação utilizando um modelo parabólico do tipo $y = ax + bx^2$, no qual y é representado por ΔP e x é a velocidade superficial na saída do filtro (local), v_s . Os parâmetros da Equação de Forchheimer (2.21) foram calculados através das constantes a e b , respectivamente por $k_1 = \mu/a$ e $k_2 = \rho/b$. A fim de avaliar o regime do escoamento e a linearidade da curva de perda de carga foram calculados o número de Reynolds da fibra (Re_f) e o número de Forchheimer (Fo) a partir das Equações (2.25) e (2.26). As porcentagens para as contribuições viscosas ($\Delta P_{\text{viscoso}}$) e inerciais ($\Delta P_{\text{inercial}}$) na perda de carga podem ser facilmente estimadas pelas Equações (2.30) e (2.31).

As Figuras 4.5 a 4.8 apresentam os ajustes das curvas de perda de carga normalizada ($\Delta P/L$). Os valores calculados do número de Re_f , do número de Fo e as porcentagens das contribuições viscosas ($\Delta P_{\text{viscoso}}$) e inerciais ($\Delta P_{\text{inercial}}$) [Figuras 4.5 a 4.8] estão apresentados nas Tabelas A.9 a A.12, encontradas no Apêndice A do presente trabalho.

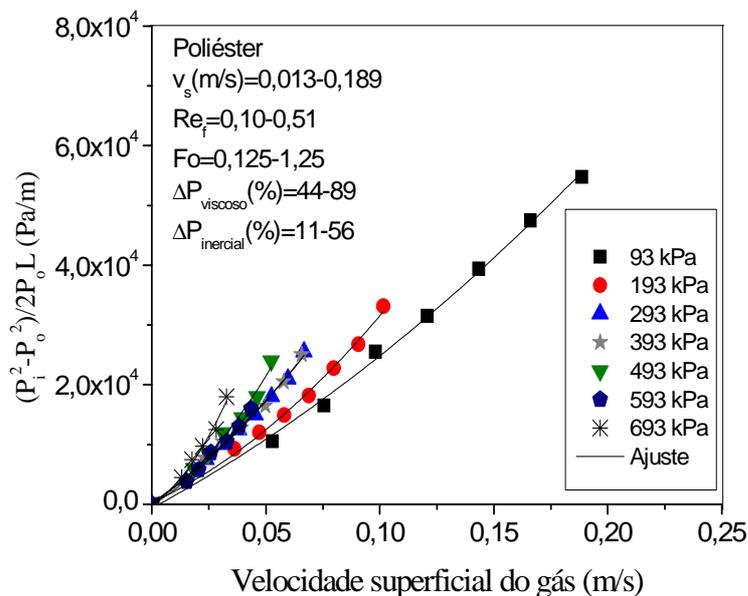


Figura 4.5: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de poliéster.

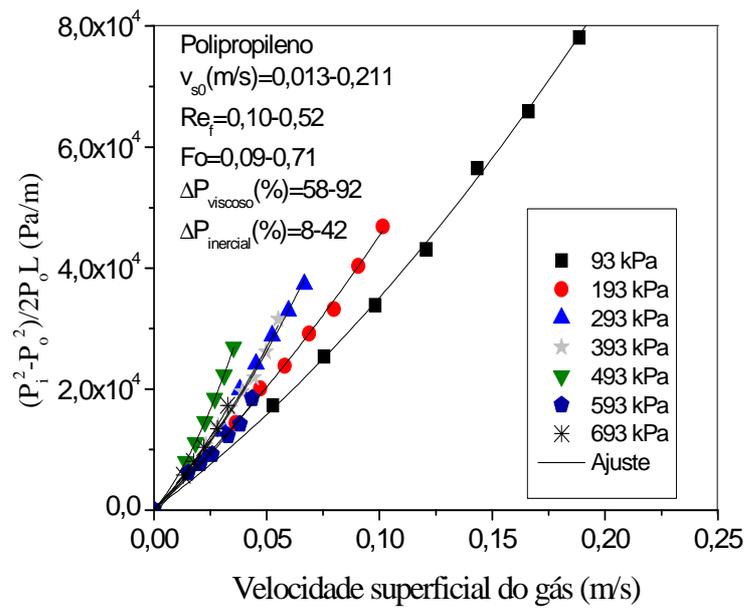


Figura 4.6: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de polipropileno.

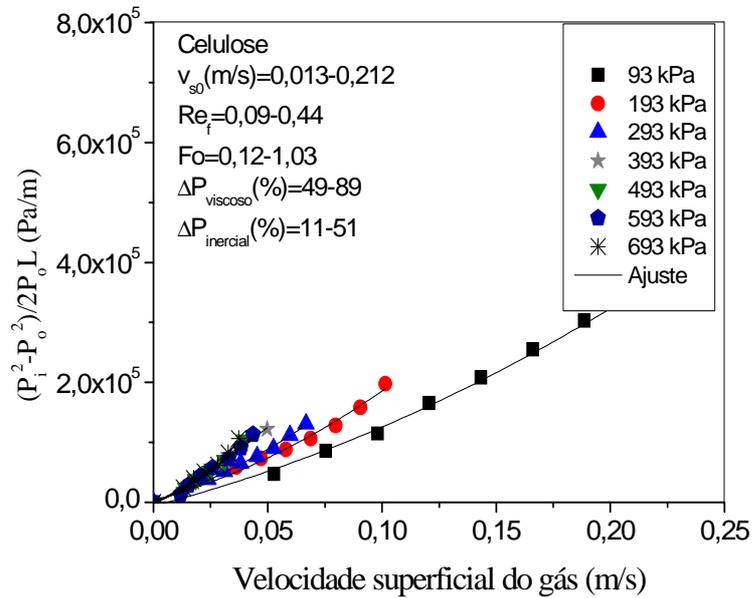


Figura 4.7: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de celulose.

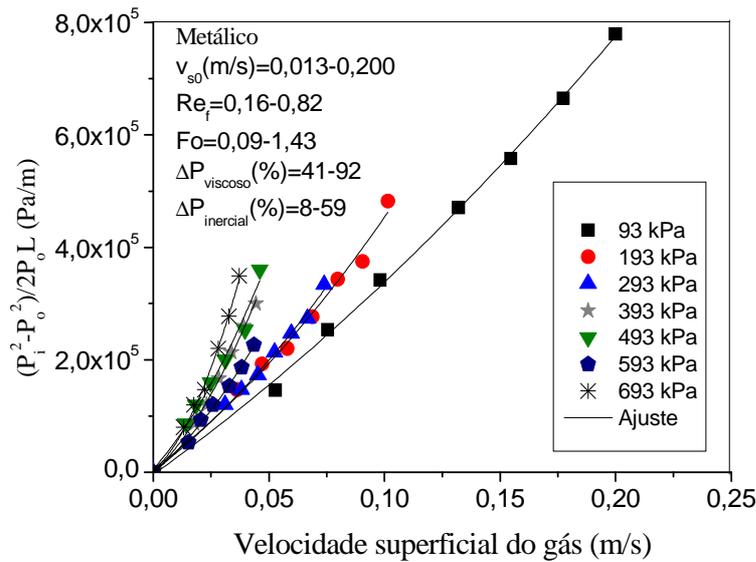


Figura 4.8: Ajuste das curvas de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro metálico.

Pela análise das Figuras 4.5 a 4.8 e Tabelas A.9 a A.12 (Apêndice A), verifica-se que o número de Reynolds das fibras (Re_f) variou na faixa 0,09 a 0,82 para todas as curvas experimentais, sendo o regime caracterizado como laminar. Entretanto, nota-se que o número de Forchheimer variou entre 0,09 a 1,43 ($Fo > 1$), sendo observada uma contribuição substancial e progressiva dos termos inerciais $[\rho v_s^2 / k_2]$ na perda de carga total (8 a 59%) com o aumento da velocidade do ar. Isto explica claramente a tendência parabólica nas curvas apresentadas nas Figuras 4.5 a 4.8 e permite concluir que apenas a Lei de Darcy ($Fo \ll 1$) não é válida para prever o modelo de queda de pressão, mesmo para velocidades de filtração relativamente baixas até 0,2 m/s.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram os coeficientes de permeabilidade Darciana (k_1) e não Darciana (k_2) para os quatro meios filtrantes estudados. Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir da média de três experimentos de permeação para cada meio filtrante, com seus respectivos desvios. No Apêndice A estão inseridos os demais ensaios de permeação realizados neste estudo.

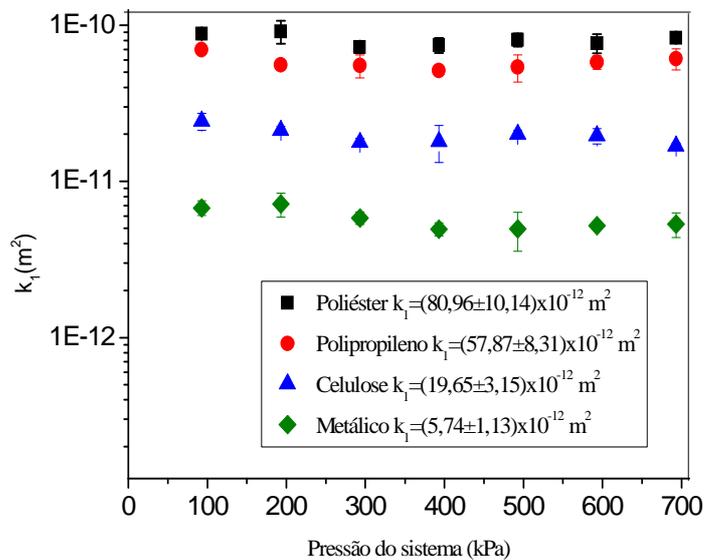


Figura 4.9: Permeabilidade Darciana (k_1) em função da pressão do sistema.

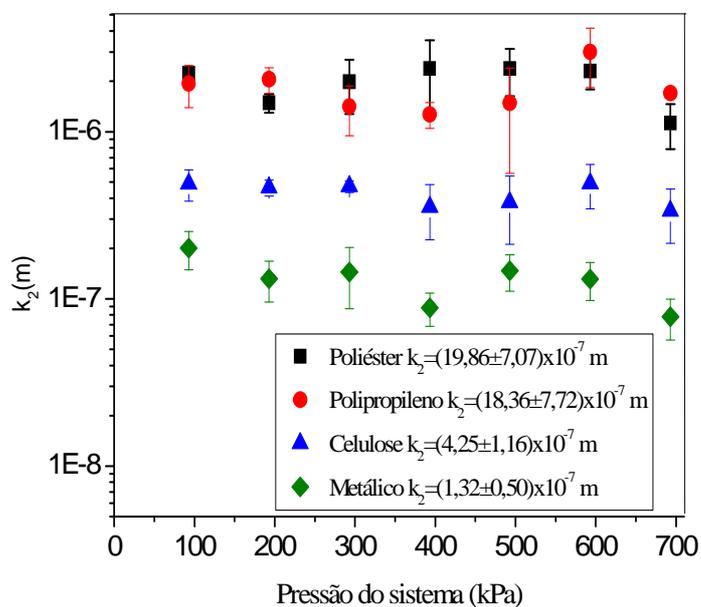


Figura 4.10: Permeabilidade não Darciana (k_2) em função da pressão do sistema.

Pela análise da Figura 4.9, observa-se que a variação do coeficiente de permeabilidade Darciana (k_1) não apresentou variações significativas até a pressão do sistema de 693 kPa, sendo que os valores tenderam a um patamar constante. De acordo com a Figura 4.10 pode se verificar que os coeficientes de permeabilidade Darciana (k_2) apresentaram uma pequena variação com a mudança da pressão (até $P=693$ kPa), porém os valores também tenderam a um valor constante. Isto mostra que os meios filtrantes não sofreram nenhum tipo de deformação até 693 kPa. Tal comportamento parece ser razoável, considerando que os filtros não são constituídos de fibras ocas, e sugere que a faixa de velocidade (0,01 a 0,21 m/s) e a queda de pressão (12 a 240 Pa) empregadas nos experimentos, não foram suficientemente altas para induzir a compressão ou deformação dos meios filtrantes.

Com isso, pode se constatar que o aumento progressivo das curvas de $\Delta P/L$ com o aumento da pressão absoluta foi afetada apenas pelas mudanças nas propriedades do fluido (μ e ρ) considerando que não houve mudanças nas características estruturais dos filtros (k_1 e k_2) para a faixa de pressão trabalhada.

Uma equação clássica para prever os valores da permeabilidade Darciana (k_1) para meios fibrosos, válido para faixa $0,06 < \alpha < 0,30$ ou $0,70 < \varepsilon < 0,94$, foi desenvolvido por Davies (HUNTEN, 2007):

$$k_1 = \frac{d_f^2}{64\alpha^{1.5}(1+56\alpha^3)} \quad (4.1)$$

Davies desenvolveu o modelo baseado na passagem do fluxo em uma fibra de diâmetro d_f e na hipótese de um fluido laminar no qual a lei de Darcy é válida ($Re_f < 1$ e $Fo \ll 1$). O uso de α e d_f , encontrados na Tabela 3.2, na Equação (4.1) permite prever razoavelmente os valores de k_1 , como mostra a Figura 4.11.

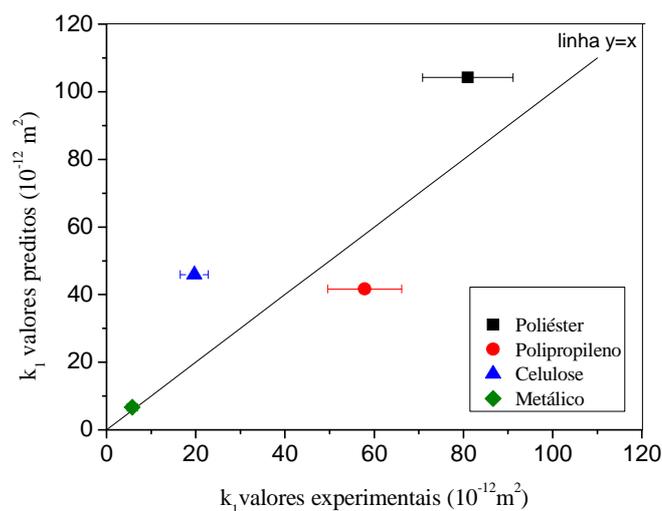


Figura 4.11: Comparação dos valores experimentais e preditos do coeficiente de permeabilidade Darciana (k_1).

4.1.2 Simulação da permeação com gás natural

Na seção anterior, vimos que a variação da pressão do gás não foi sensível a mudança na estrutura dos filtros para certos limites de velocidades. Assumindo que os parâmetros de permeabilidade k_1 and k_2 obtidos experimentalmente não sofreram alterações (deformações) com a variação da pressão, uma simulação para permeação de gás natural a alta pressão através dos quatro meios filtrantes foi realizada adotando limites similares de velocidades (0,01 a 0,21 m/s) e pressões variando entre 100 kPa até 5000 kPa, de acordo como proposto por Innocentini et al., (2011).

Com este propósito, a perda de carga foi simulada para um meio filtrante com geometria cilíndrica com fluxo radial, sendo utilizada a Equação de Forchheimer (2.22). A altura H e o diâmetro externo D_e foram fixados respectivamente em 0,50 m e 0,28 m, o qual resultou em uma área externa $A_e=0,44 \text{ m}^2$. O diâmetro interno do filtro D_i foi calculado por $D_i = D_e - 2L$ com base na espessura de cada elemento filtrante dado na Tabela 3.2.

A composição molar do gás natural utilizada para o cálculo do fator de compressibilidade (Z_o), da densidade do gás (ρ_o) e da viscosidade do gás (μ_o) foi apresentada na Tabela 3.3. As propriedades do gás natural Z_o (Equação 3.4), ρ_o (Equação 3.3) e μ_o (Equação 3.7) utilizadas nas simulações foram calculadas, conforme mencionado no Capítulo 3 e estão apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Propriedades do gás natural a 20°C para diferentes pressões.

Pressão, P_o (kPa)	Z_o (-)	ρ_o (kg/m ³)	μ_o (Pa.s)
100	1,00	0,71	$1,11 \times 10^{-5}$
500	0,99	3,54	$1,12 \times 10^{-5}$
1000	0,98	7,17	$1,13 \times 10^{-5}$
2500	0,95	18,50	$1,16 \times 10^{-5}$
5000	0,90	38,97	$1,23 \times 10^{-5}$

Nas Figuras 4.12 a 4.15 estão apresentados os resultados simulados da perda de carga (ΔP) em função da velocidade do gás natural (v_{so}) para os quatro meios filtrantes estudados.

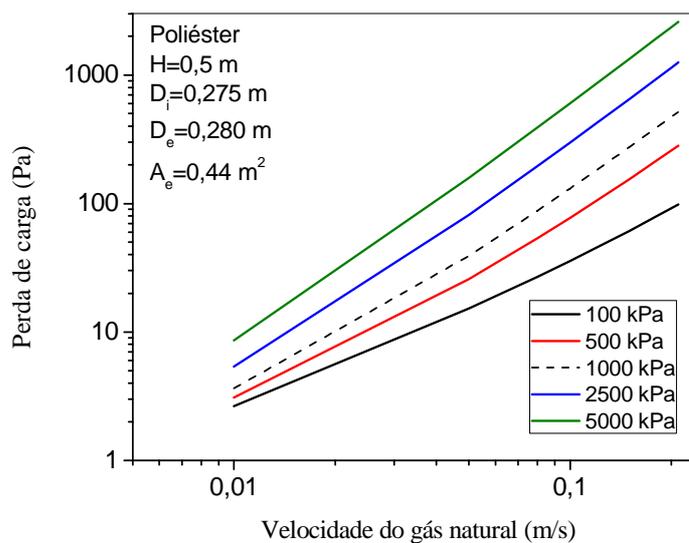


Figura 4.12: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de poliéster.

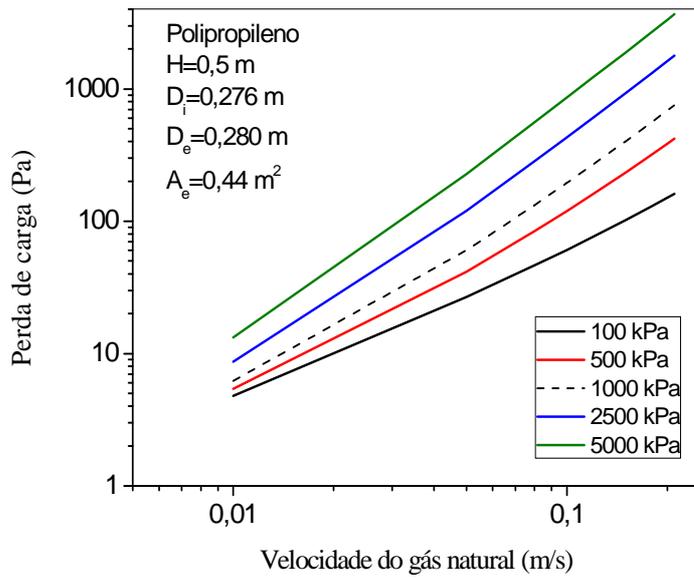


Figura 4.13: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de polipropileno.

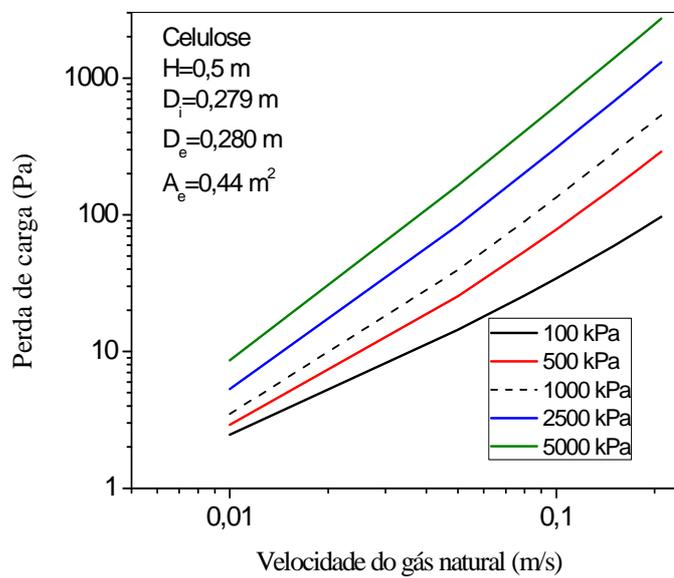


Figura 4.14: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de celulose.

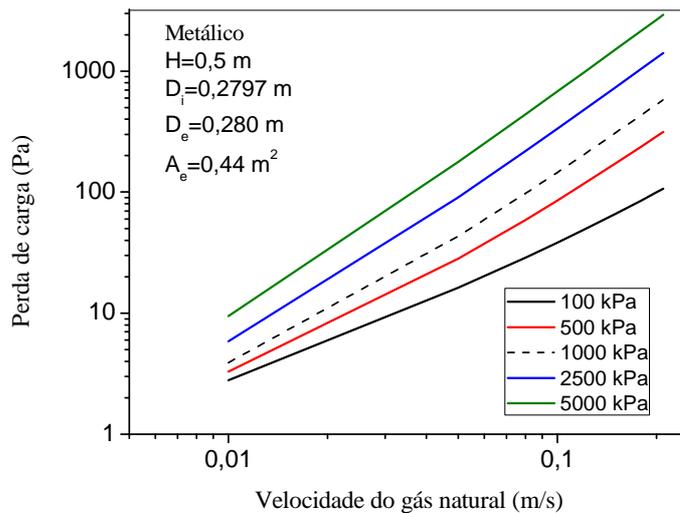


Figura 4.15: Simulação da perda de carga em função da velocidade do gás natural no filtro de metálico.

De acordo com as Figuras 4.12 a 4.15, verifica-se que para uma mesma velocidade do gás natural aplicada na filtração, o aumento da pressão do sistema proporcionou um aumento na perda de carga diferencial no filtro. Conforme já mencionado anteriormente, as mudanças ocorridas nas propriedades do gás (μ_o e ρ_o) induzem o aumento da perda de carga devido à dissipação de energia pelos termos viscosos e inerciais da Equação de Forchheimer (Equação 2.22), uma vez assumido que as propriedades dos meios filtrantes não sofreram deformações (k_1 e k_2).

Comparativamente, observa-se que as curvas de permeação simuladas para os quatro meios filtrantes, nas Figuras 4.12 a 4.15, apresentam a seguinte tendência de resistência ao escoamento: Polipropileno>Metálico>Celulose>Poliéster. Aparentemente contraditória, quando comparada com as Figuras 4.5 a 4.8 (Metálico>Celulose>Polipropileno>Poliéster), porém a divergência está ligada a diferente maneira na qual a permeabilidade é expressa: as curvas de perda de carga normalizada pela espessura média ($\Delta P/L$), mostradas nas Figuras 4.5 a 4.8, são utilizadas para identificar e comparar os meios filtrantes que apresentam diferentes coeficientes de permeabilidade intrínseca (k_1 e k_2). Já, as curvas de perda de carga (ΔP)

determinadas pelas Figuras 4.12 a 4.15 fornecem uma medida direta da resistência ao escoamento de cada meio filtrante quando está em operação, incluindo a contribuição da espessura e dos coeficientes de permeabilidade intrínseca. Entretanto, o filtro com alto coeficiente de permeabilidade não necessariamente apresenta a menor perda de carga, pois existe também a dependência da espessura do filtro.

Os benefícios econômicos para operação do gás natural para altas pressões podem ser melhores observados quando a perda de carga é expressa em função da vazão mássica do gás natural, conforme apresentadas nas Figuras 4.16 a 4.19.

Para um dado meio filtrante com área fixa, as maiores capacidades de permeação são alcançadas pelo aumento da velocidade superficial (v_s) ou aumento da densidade do gás (ρ). Considerando o menor efeito da pressão na viscosidade do gás (μ), a perda de carga é linearmente dependente de ρ , porém, é proporcional ao quadrado de v_s , especialmente para $Fo > 1$. Desta forma, maiores volumes de gás natural podem ser tratados sobre uma perda de carga fixa, quando um filtro operar em altas pressões de gás e baixas velocidades de filtração ou o oposto, isto é, baixas pressões de gás e altas velocidades de filtração.

Por exemplo, pelas análises das Figuras 4.12 e 4.16, observa-se que o filtro de poliéster pode apresentar uma mesma perda de carga no filtro de $\Delta P = 100$ Pa na pressão de operação de 100 kPa e velocidade de 0,23 m/s ou na pressão de operação de 5000 kPa e velocidade de 0,05 m/s. Entretanto a capacidade de filtração para a pressão de 100 kPa é somente 250 kg/h enquanto que para a pressão de 5000 kPa a capacidade aumenta para 2500 kg/h. Comportamento similares são observados nas Figuras 4.13 a 4.15 e 4.17 a 4.19 com os demais meios filtrantes. Comparando os resultados para a mesma perda de carga, o poliéster apresenta a maior capacidade de permeação e o polipropileno a menor, embora as diferenças visuais não sejam tão claras devido à escala logarítmica de ΔP .

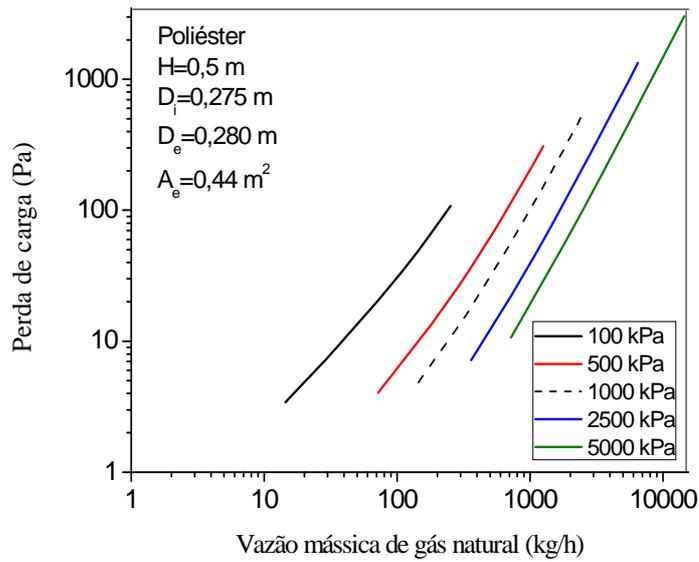


Figura 4.16: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de poliéster.

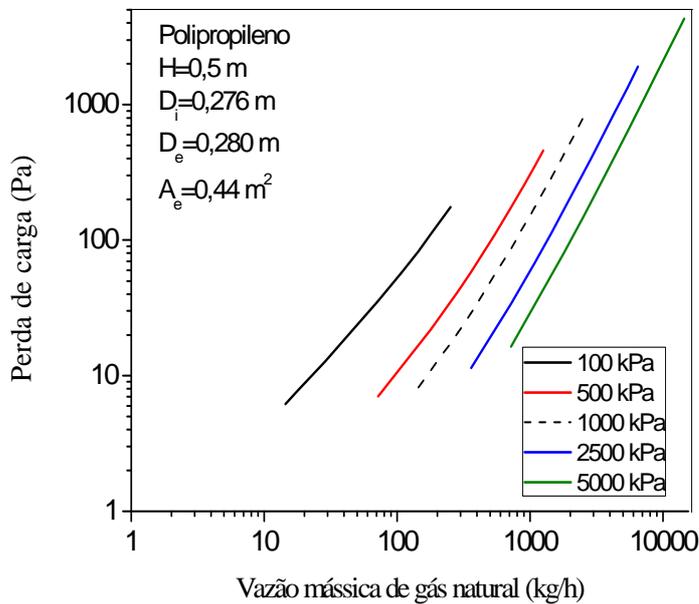


Figura 4.17: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de polipropileno.

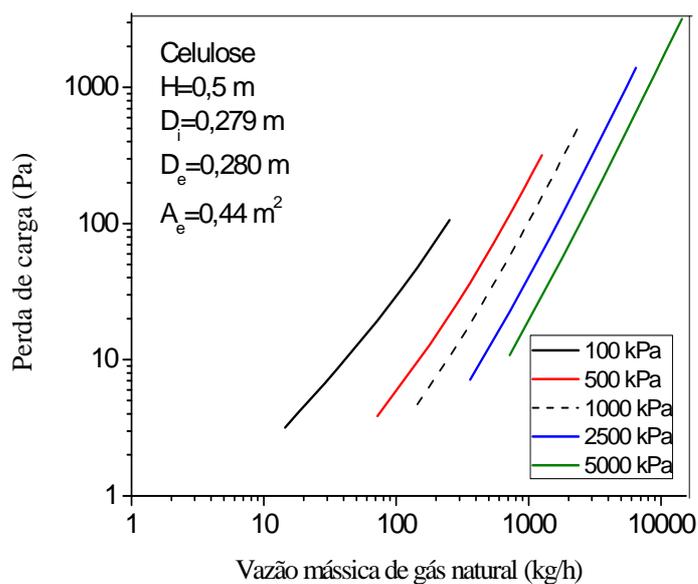


Figura 4.18: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de Celulose.

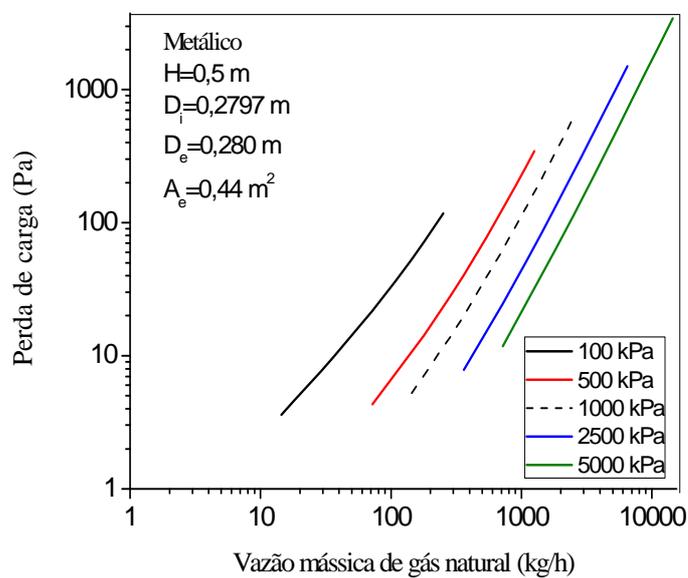


Figura 4.19: Simulação da perda de carga em função da vazão mássica do gás natural no filtro de Metálico.

4.2 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

4.2.1 Perda de carga no filtro

Para a realização das curvas de perda de carga no meio filtrante, adicionou-se o material particulado (rocha fosfática) no compartimento de armazenamento para sua inserção na corrente gasosa por meio de uma rosca sem fim acoplado a um motor. A vazão mássica de pó na corrente gasosa foi controlada por um variador de velocidade e mantida em 0,005 g/s.

A velocidade superficial de filtração utilizada nos experimentos foi fixada em 0,05 m/s para todos os experimentos, e as pressões absolutas do sistema variadas em 193, 393 e 693 kPa. Estes valores foram determinados devido a algumas limitações impostas pelo equipamento. A perda de carga máxima admitida nos quatro meios filtrantes foi estabelecida em 1100 Pa. Este valor foi escolhido, pois o meio filtrante utilizado nos ensaios apresentava-se na posição vertical, o qual a formação de tortas muito espessas poderia levar a desestruturação das mesmas na hora da retirada do equipamento. Os valores da perda de carga (ΔP) em função do tempo de filtração (t) foram obtidos durante os experimentos. Estes conjuntos de (ΔP) foram posteriormente plotados em função da massa de pó depositada por unidade de área W (kg/m^2), conforme mencionado no Capítulo 3.

As curvas de perda de carga (ΔP) em função da massa de pó depositada (W) estão apresentadas nas Figuras 4.20 a 4.23 para os meios filtrantes de poliéster, de polipropileno, de celulose e metálico, respectivamente.

De acordo com as Figuras 4.20 e 4.21, verifica-se que no período inicial de filtração (até $\approx 0,10 \text{ kg/m}^2$ de massa de pó depositada), os filtros de poliéster e de polipropileno apresentaram uma mesma tendência de aumento na perda de carga sem nenhuma influência da pressão do sistema. Porém, a partir daí, observa-se que o aumento da pressão do sistema

diminuiu a perda de carga no filtro, sendo que a menor pressão do sistema apresentou a menor massa de pó depositada ao atingir a perda de carga máxima estabelecida de 1100 Pa.

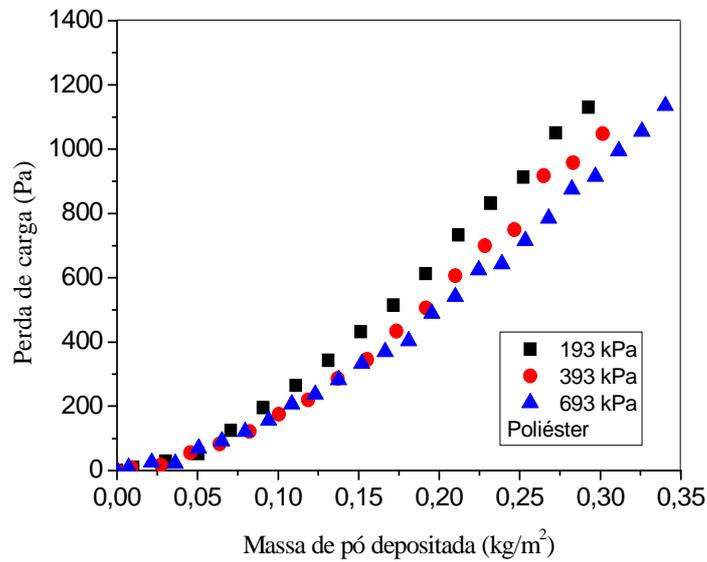


Figura 4.20: Curvas de perda de carga em função massa de pó depositada no filtro de poliéster.

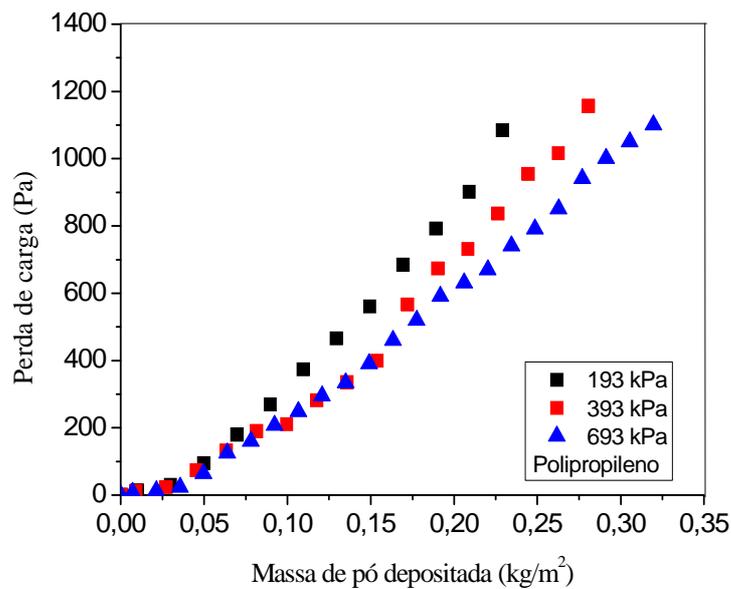


Figura 4.21: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro de polipropileno.

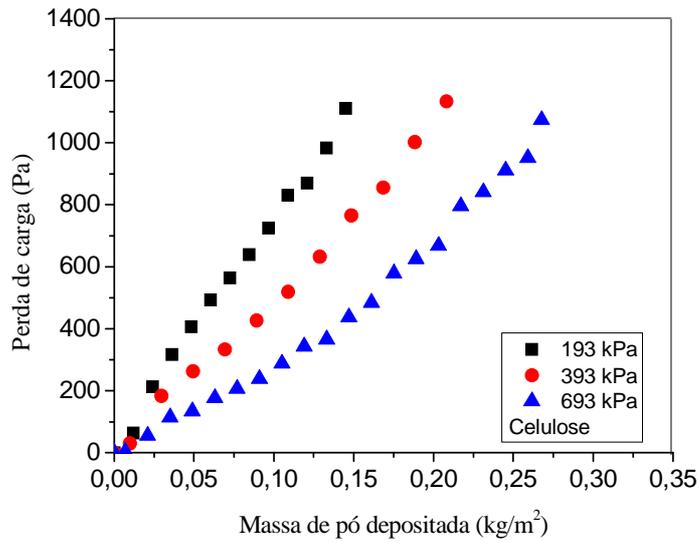


Figura 4.22: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro de celulose.

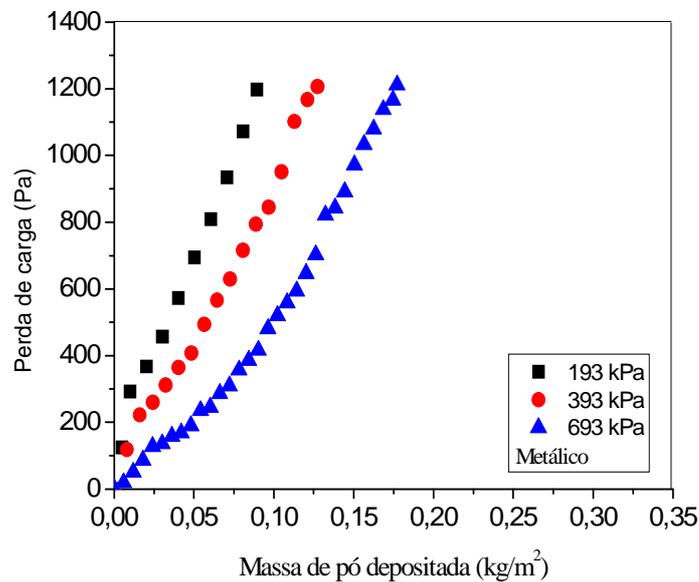


Figura 4.23: Curvas de perda de carga em função massa depositada no filtro metálico.

Uma explicação para o comportamento das curvas nas Figuras 4.20 e 4.21 é que no período inicial da filtração, os filtros de poliéster e de polipropileno apresentam maior

filtração interna, sendo que a variação da pressão do sistema não interferiu no comportamento das curvas. No entanto, a partir do momento que ocorreu a formação das tortas de filtração, a pressão do sistema pode ter agido sobre as mesmas, modificando as características estruturais e tornando-as menos resistentes ao escoamento do gás para as pressões mais elevadas.

Pela análise das Figuras 4.22 e 4.23, observa-se que já no período inicial da filtração as curvas apresentaram-se distintas, em que a elevação da pressão do sistema diminuiu a perda de carga no filtro. Este comportamento pode ser explicado pelo fato dos filtros de celulose e metálico apresentarem uma filtração mais superficial em relação aos filtros de poliéster e polipropileno. Esta rápida formação da torta de filtração fez com que a pressão do sistema pudesse atuar logo no período inicial da filtração, tornando a torta menos resistente ao escoamento para as pressões mais elevadas.

A Figura 4.24 apresenta um comparativo das curvas de filtração para os quatro meios filtrantes operados a uma pressão absoluta do sistema de 693 kPa.

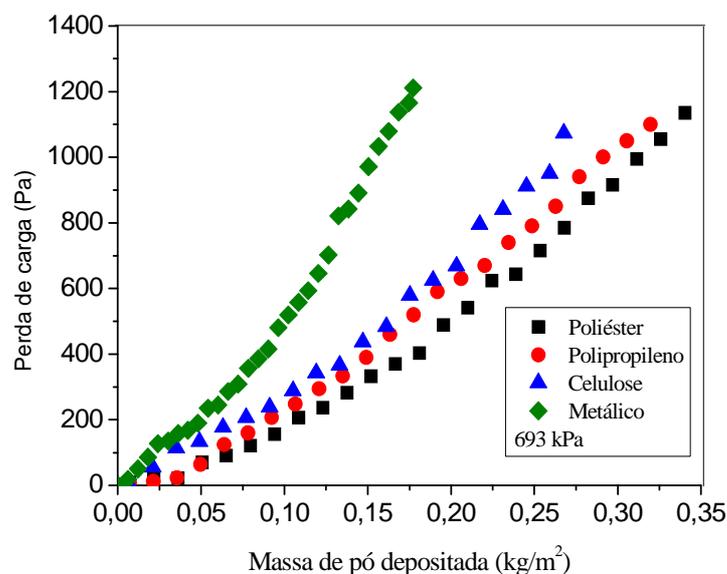


Figura 4.24: Comparativo das curvas de filtração dos meios filtrantes na pressão do sistema de 693 kPa.

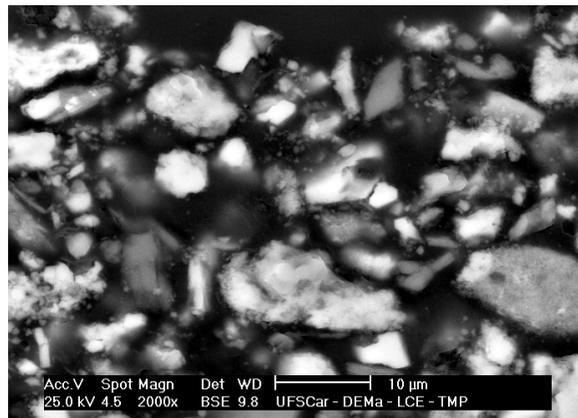
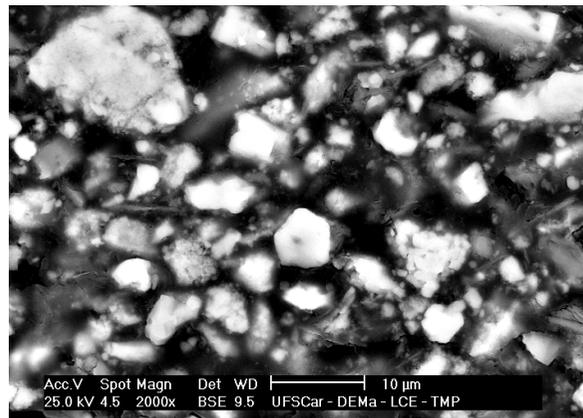
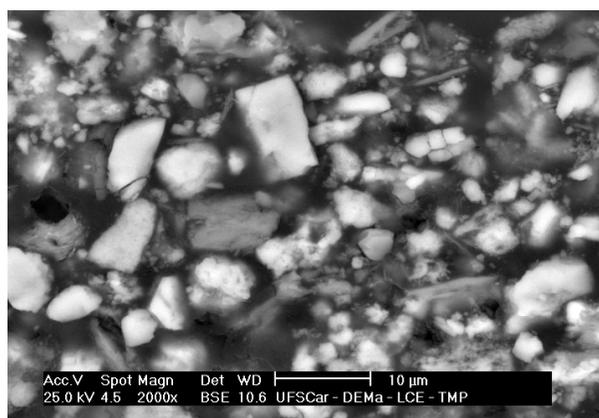
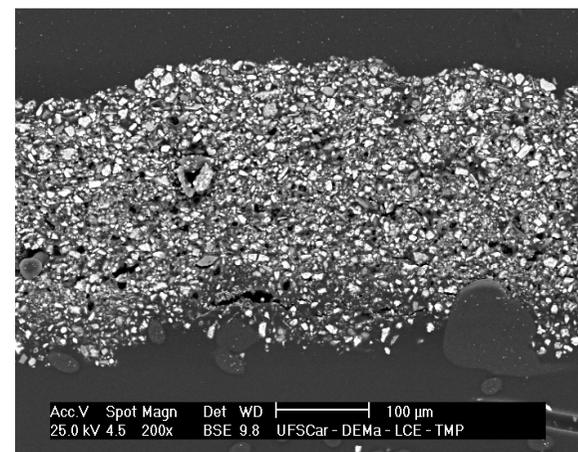
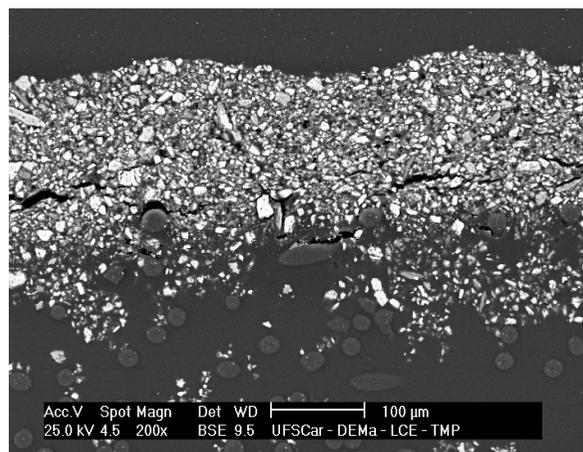
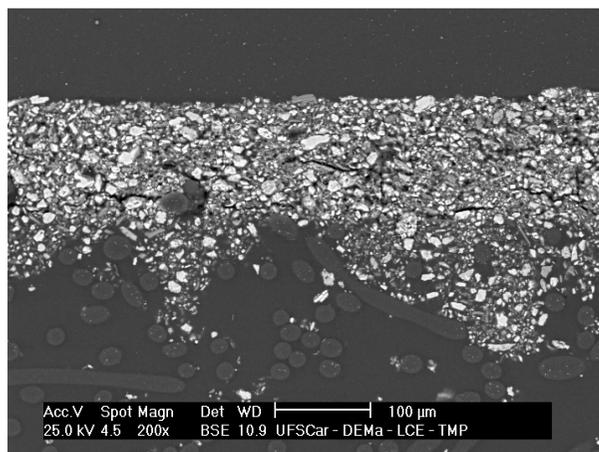
De acordo com a Figura 4.24, verifica-se que o filtro metálico (estrutura trançada) apresentou a maior perda de carga para uma mesma massa de pó depositada no filtro, em relação aos filtros não trançados (celulose> polipropileno>poliéster). Isto mostra que as diferenças nas características estruturais dos meios filtrantes interferem nas características de formação da torta de filtração e podem influenciar na perda de carga do filtro.

Comportamento semelhante foi observado por Donovan (1985). O autor afirmou que em tecidos não trançados a formação da torta ocorre mais lentamente que em tecidos trançados. Isto porque o espaço disponível para passagem do fluxo em um tecido trançado é mais concentrado que em um não trançado, e o bloqueio desta passagem ocorre mais rapidamente por causa deste fluxo concentrado.

4.2.2 Porosidade experimental da torta

Após o término dos ensaios de filtração, os meios filtrantes passaram pelas etapas de tratamento, conforme mencionado no Capítulo 3, para possibilitar a obtenção das imagens no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Posteriormente, as imagens geradas no MEV foram analisadas utilizando o programa Image-Pro Plus 7.0.

Neste programa a utilização do recurso de binarização de imagens, permitiu transformar a imagem real em apenas dois níveis de cores: pontos claros (as partículas) e os pontos escuros (espaços porosos). Com a área de cada ponto quantificada foi possível então determinar a porosidade experimental da torta para os quatro filtros estudados. As Figuras 4.25 a 4.28 mostram as imagens de tortas de filtração geradas no MEV, para os meios filtrantes de poliéster, de polipropileno, de celulose e metálico, respectivamente.

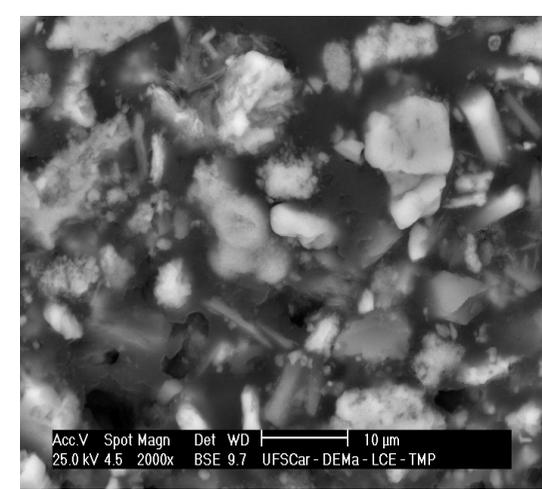
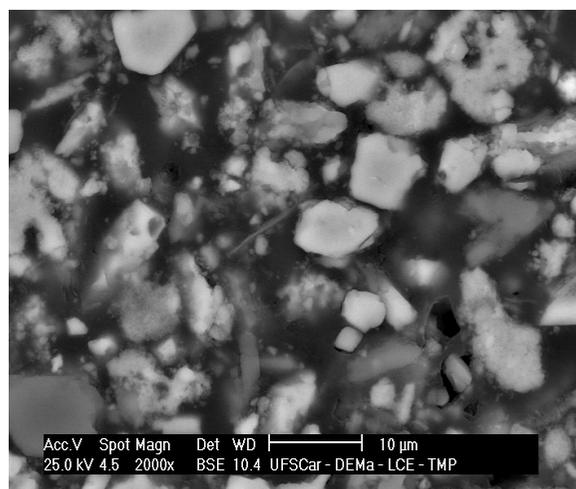
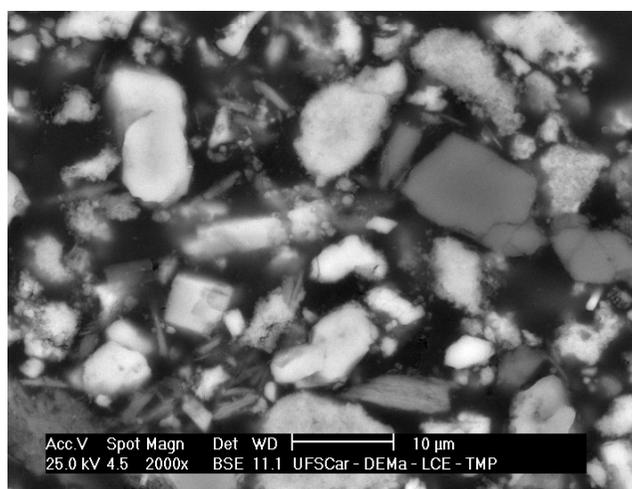
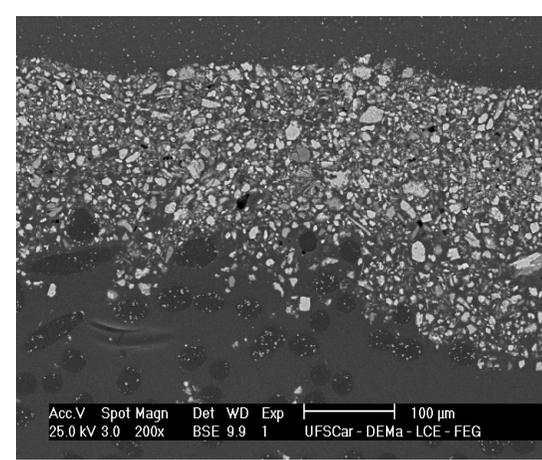
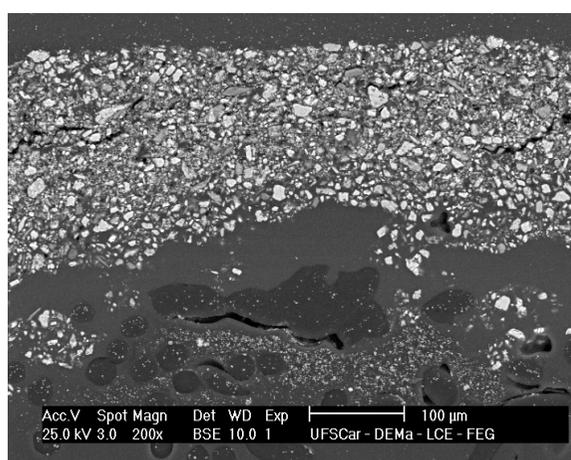
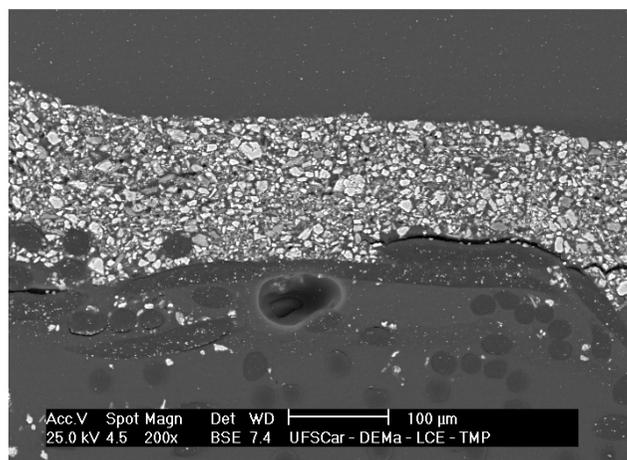


(a)

(b)

(c)

Figura 4.25: Imagens da torta de filtração no filtro de poliéster para as pressões: a) $P=193$ kPa, b) $P=393$ kPa e c) $P=693$ kPa.

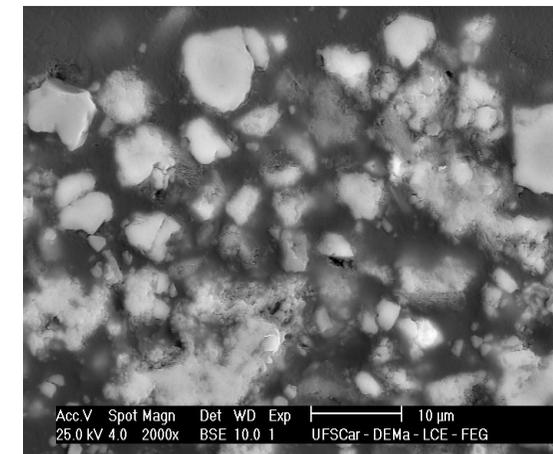
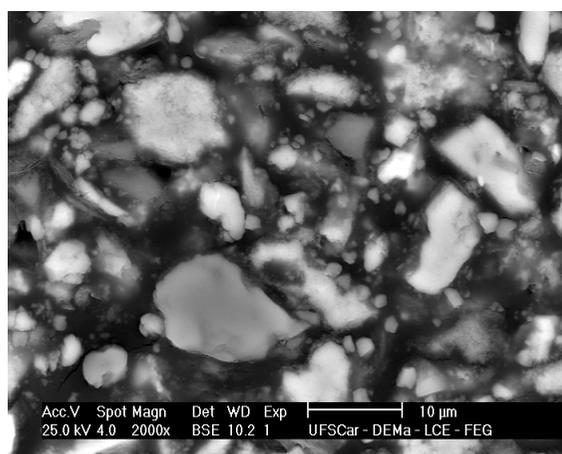
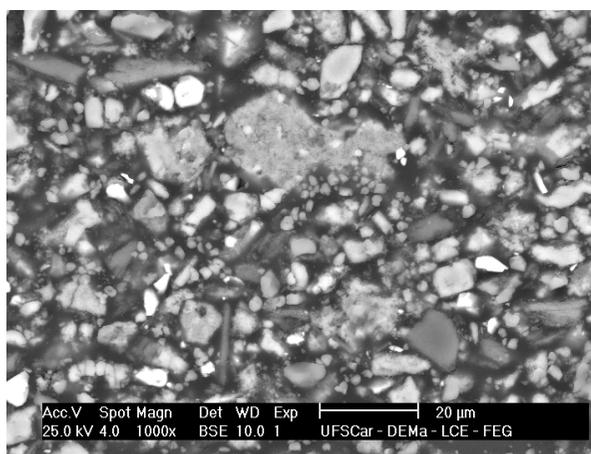
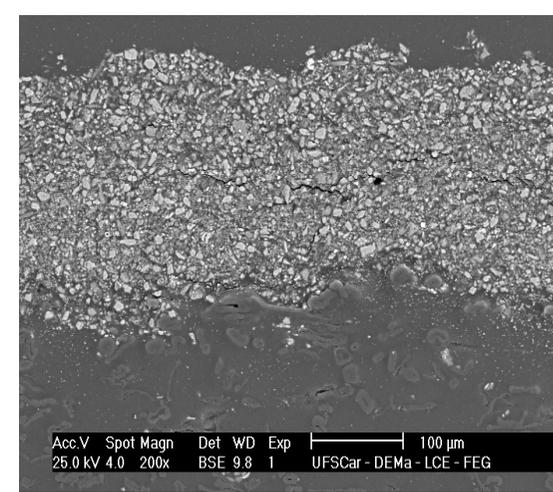
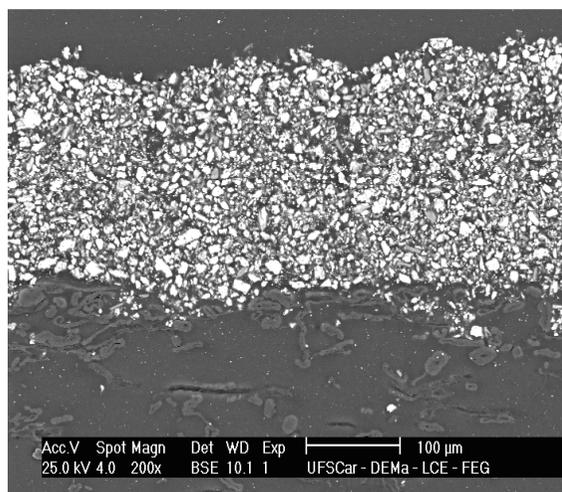
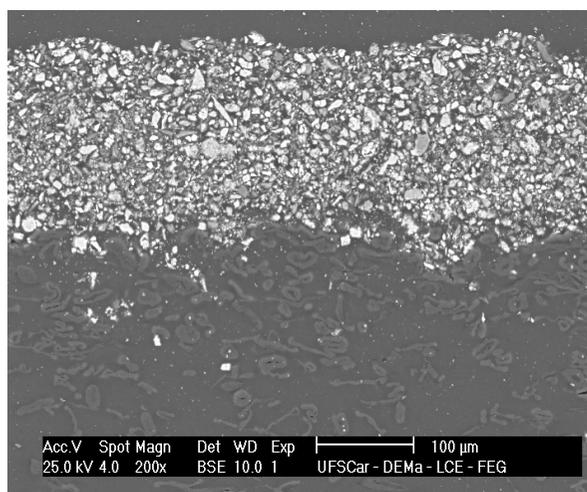


(a)

(b)

(c)

Figura 4.26: Imagens da torta de filtração no filtro de polipropileno para as pressões: a) $P=193$ kPa, b) $P=393$ kPa e c) $P=693$ kPa.

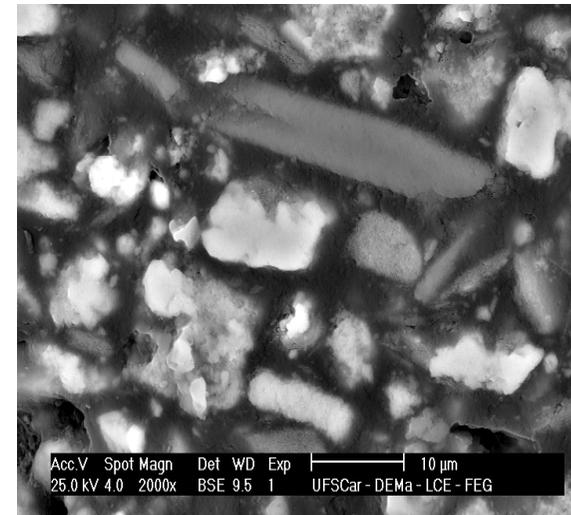
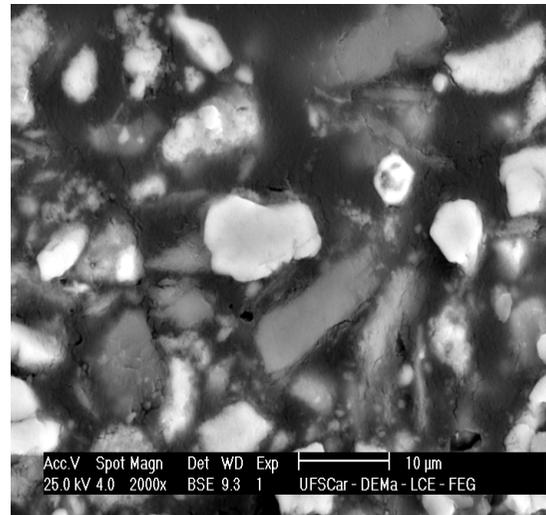
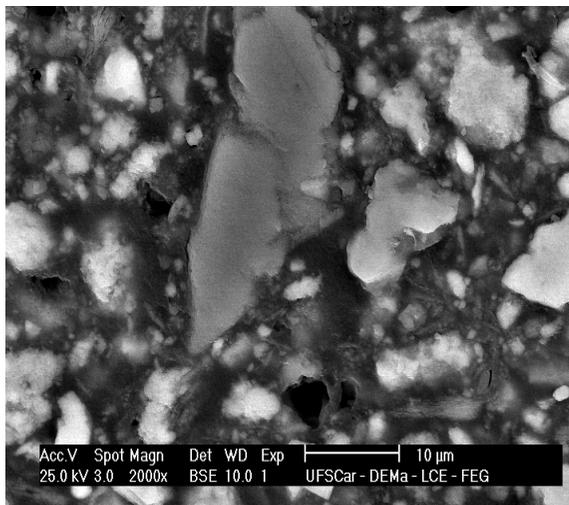
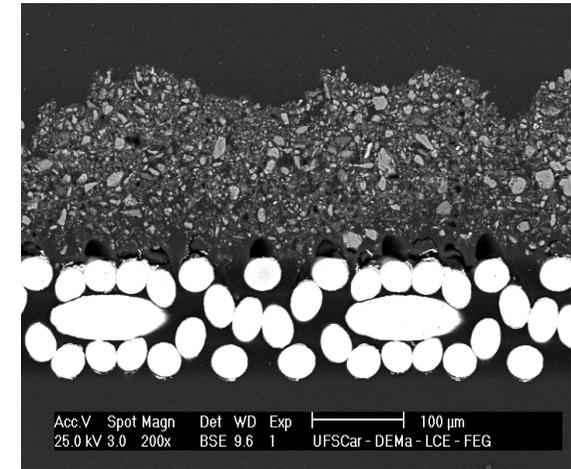
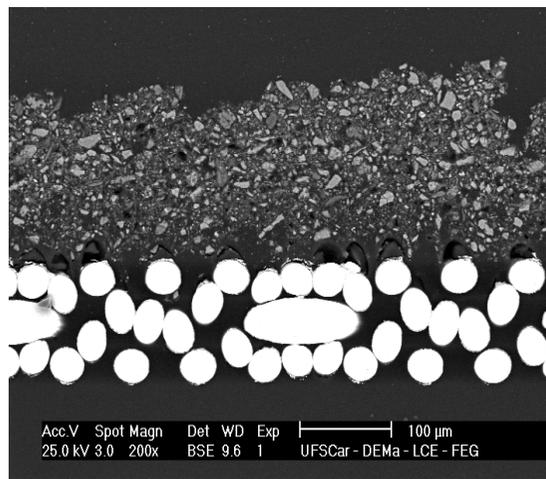
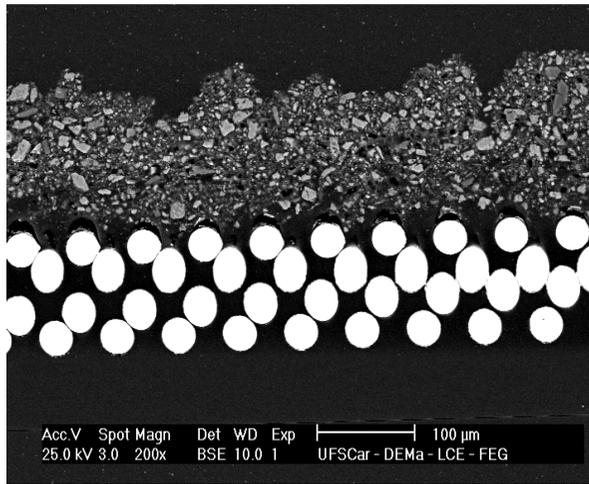


(a)

(b)

(c)

Figura 4.27: Imagens da torta de filtração no filtro de celulose para as pressões: a) $P=193$ kPa, b) $P=393$ kPa e c) $P=693$ kPa.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.28: Imagens da torta de filtração no filtro metálico para as pressões: a) P=193 kPa, b) P=393k Pa e c) P=693 kPa.

A Figura 4.29 apresenta os resultados das porosidades experimentais das tortas para os quatro meios filtrantes estudados.

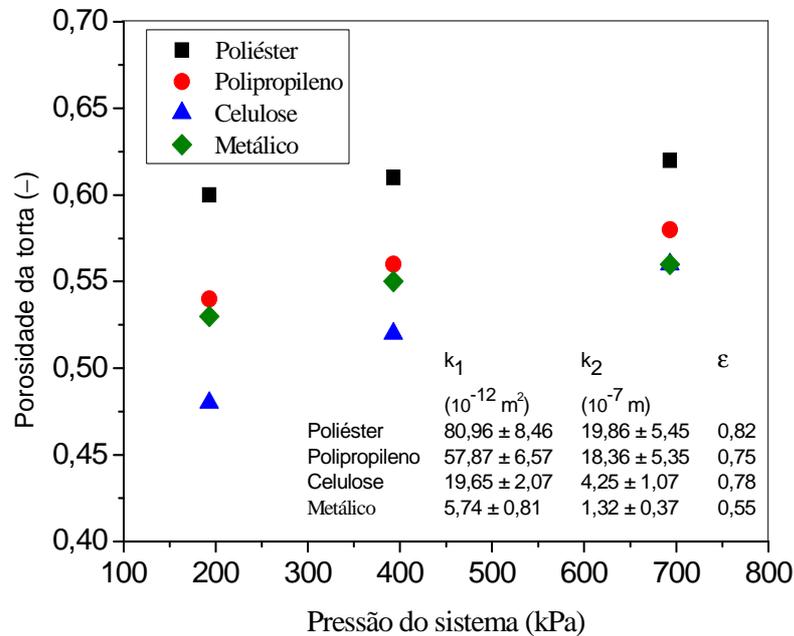


Figura 4.29: Porosidade experimental da torta, com a variação da pressão do sistema nos meios filtrantes.

Pela análise da Figura 4.29, nota-se que um aumento na pressão do sistema proporcionou um aumento nas porosidades das tortas de filtração. Este comportamento indica que as tortas estão tornando-se mais porosas com a variação da pressão, reduzindo a resistência do escoamento do ar e diminuindo as perdas de carga durante os ensaios de filtração. Uma hipótese para este comportamento pode estar relacionada com o tamanho de partículas que alcançam o meio filtrante, devido à sedimentação das mesmas com a variação da pressão, no qual influencia na formação das tortas de filtração.

Entre os meios filtrantes verifica-se que a menor porosidade de torta foi encontrada no filtro de celulose, seguido do metálico, de polipropileno e de poliéster. Isto mostra que os filtros com características de filtração superficial apresentaram tortas mais compactas e resistentes ao escoamento do gás.

4.2.3 Comparação da porosidade experimental da torta com modelos da literatura

Os resultados da porosidade experimental da torta foram comparados com os modelos da literatura, apresentados no Capítulo 2, correspondente à Revisão Bibliográfica.

Desta forma, para a determinação das porosidades teóricas foram utilizadas as correlações de Ergun (Eq.2.41), de Endo (Eq.2.44) e a de Rudnick-Happel (Eq.2.46). O diâmetro de partículas assumido para o cálculo da porosidade foi o diâmetro médio geométrico, conforme apresentado na Tabela 3.1. Os resultados comparativos da porosidade experimental e teórica em função da variação da pressão do sistema estão apresentados nas Figuras 4.30 a 4.33.

De acordo com as Figuras 4.30 a 4.33, nota-se que os resultados da porosidade da torta teórica foram próximos ao determinado experimentalmente, porém dependendo do filtro utilizado, existiu uma correlação que melhor ajustou os pontos experimentais.

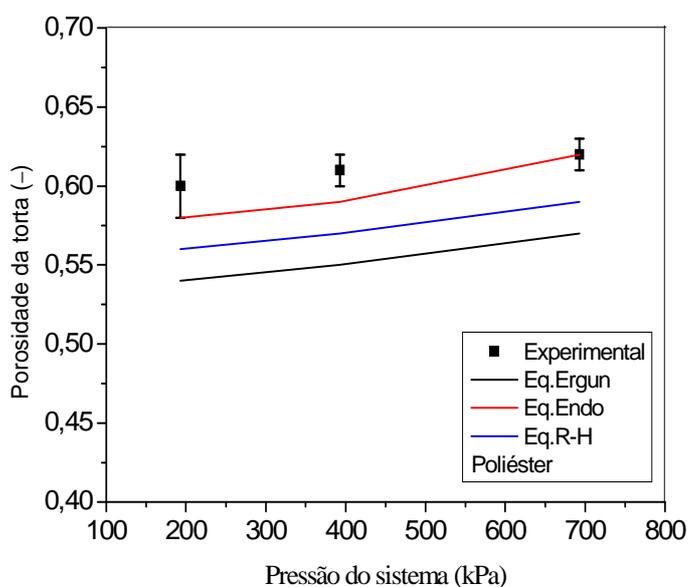


Figura 4.30: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de poliéster.

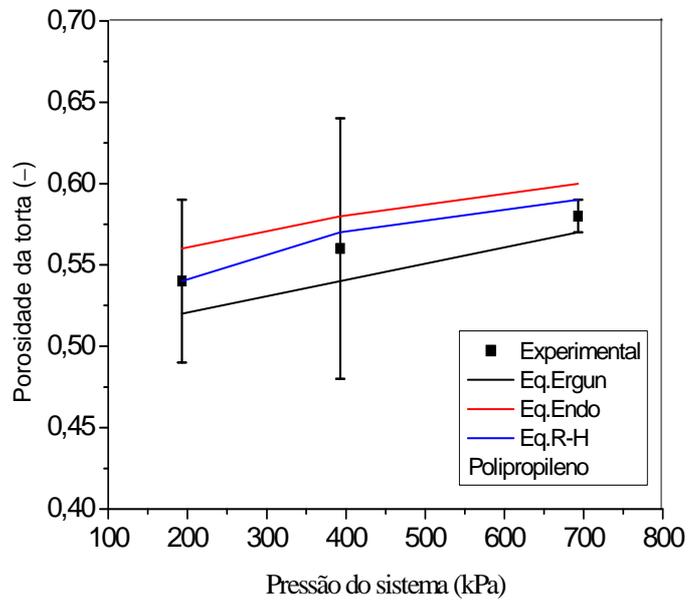


Figura 4.31: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de polipropileno.

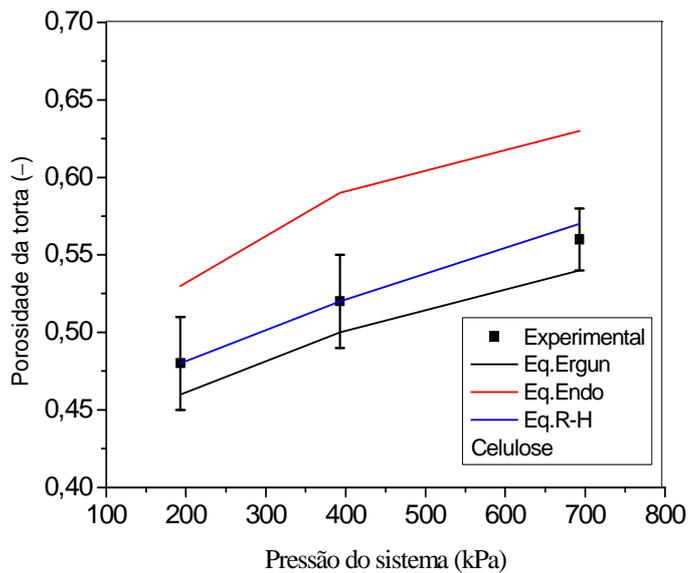


Figura 4.32: Porosidade experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro de celulose.

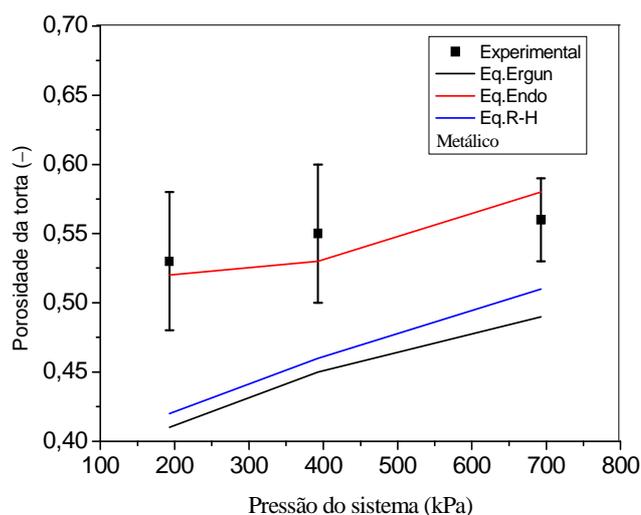


Figura 4.33: Porosidade da torta experimental e teórica da torta de filtração com a variação da pressão do sistema no filtro metálico.

Verifica-se que a correlação de Rudnick-Happel teve um bom ajuste para os filtros de polipropileno e celulose, porém, apresentou desvios para os filtros de poliéster e metálico. A correlação de Ergun teve um bom ajuste dentro da faixa de desvios nos filtros de polipropileno e celulose, porém, também não obteve um bom ajuste para os filtros de poliéster e metálico. A correlação de Endo ajustou-se dentro da faixa de desvios nos filtros de poliéster (exceto a $P=193$ kPa), polipropileno (exceto a $P=693$ kPa) e o metálico, porém não obteve um bom ajuste para o filtro de celulose.

Com isso, nota-se que a correlação de Endo foi a que melhor representou os resultados experimentais para a determinação da porosidade da torta de filtração, nos filtros analisados neste estudo.

4.2.4 Resistência específica da torta

Os resultados da resistência específica da torta foram determinados a partir dos dados experimentais através da razão da pressão diferencial da torta e a velocidade superficial do

gás ($\Delta P_c/v_s$) em função da massa de pó depositada (W), utilizando a Equação (2.36) por meio de um ajuste linear ($y=ax$). Os valores da resistência específica da torta em função da pressão do sistema estão apresentados na Figura 4.34.

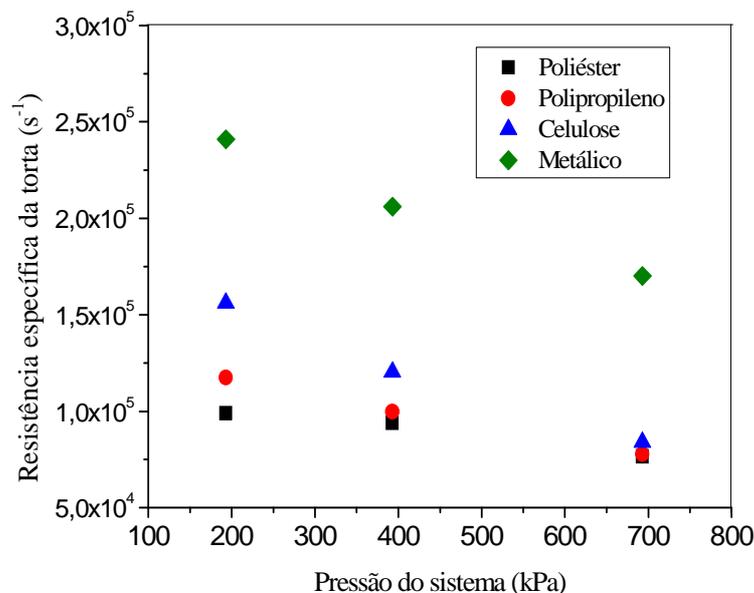


Figura 4.34: Resistência específica da torta de filtração.

Pela análise da Figura 4.34, observa-se que à medida que a pressão do sistema aumentou a resistência específica da torta diminuiu. Isto mostra que as tortas ficaram menos resistentes ao escoamento com aumento da pressão durante os ensaios de filtração. Este fato resultou em menores perdas de carga nos filtros, para uma mesma massa de pó depositada no filtro, conforme já mencionando anteriormente.

Entre os meios filtrantes a maior resistência específica da torta no filtro foi encontrada no filtro metálico, seguidos pelos filtros de celulose, de polipropileno e de poliéster, respectivamente. Isto indica que filtros que apresentam estruturas com menores permeabilidades e menores porosidades apresentaram tortas mais compactas e mais resistentes ao escoamento do gás.

4.2.5 Eficiência de coleta experimental

O procedimento experimental para a eficiências de coleta das partículas foi determinado nas mesmas condições dos ensaios de filtração ($v_s=0,05$ m/s e $P=193, 393$ e 693 kPa), porém a vazão mássica de pó alimentada na corrente gasosa foi menor ($\approx 0,0008$ g/s). Essa diminuição da vazão de pó em relação aos ensaios de filtração ocorreu devido à limitação da concentração de entrada no contador de partículas. As medidas das concentrações de partículas antes e depois foram realizadas apenas para filtros limpos, sem a formação de torta de filtração, utilizando um contador de partículas da marca Klotz, modelo Abakus Mobil Air. Conforme já mencionado no Capítulo 3, as eficiências fracionárias experimentais foram determinadas pela Equação (3.8).

As Figuras 4.35 a 4.38 apresentam as eficiências fracionárias nos filtros de poliéster, de polipropileno, de celulose e metálico, respectivamente.

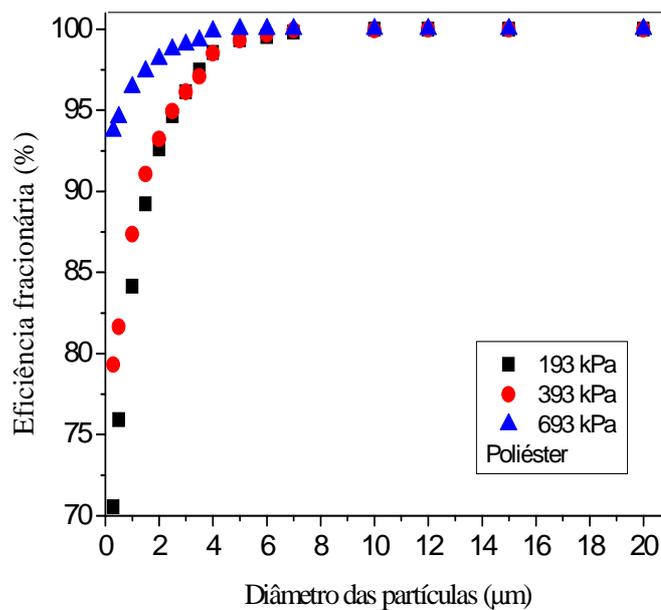


Figura 4.35: Eficiência fracionária do filtro de poliéster.

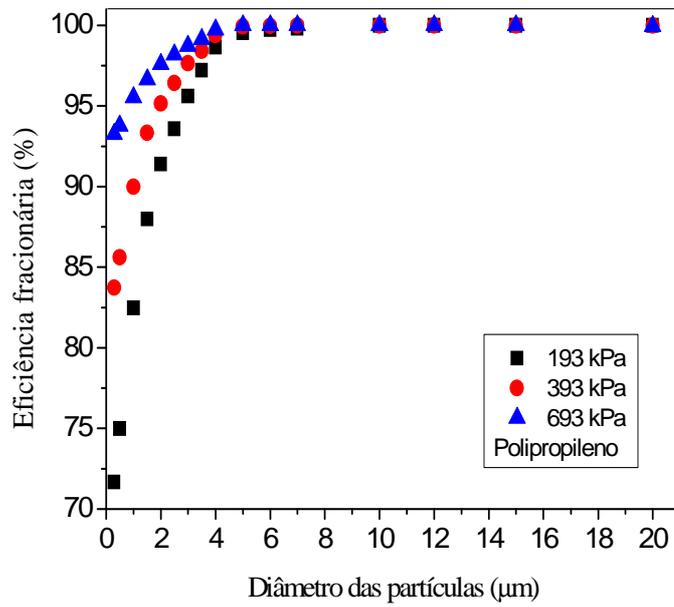


Figura 4.36: Eficiência fracionária do filtro de polipropileno.

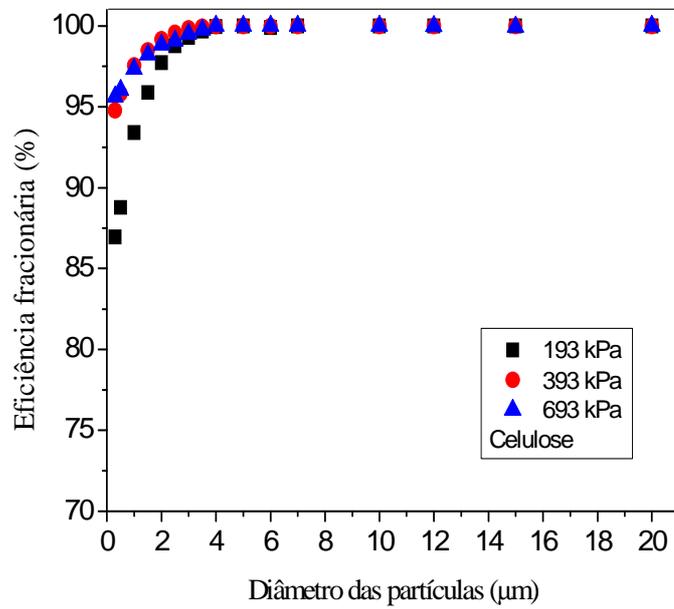


Figura 4.37: Eficiência fracionária do filtro de celulose.

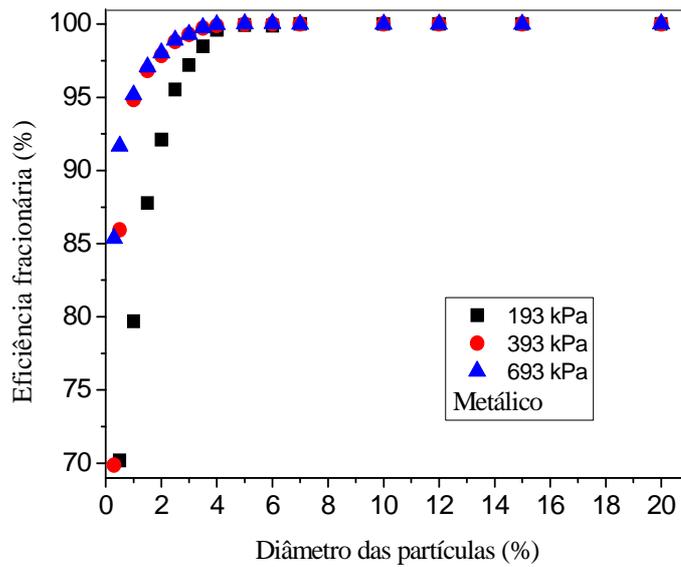


Figura 4.38: Eficiência fracionária do filtro metálico.

De acordo com as Figuras 4.35 a 4.38, verifica-se que para as partículas menores que $5,0 \mu\text{m}$, o aumento da pressão no sistema proporcionou um aumento na eficiência de coleta de partículas. Uma hipótese para este comportamento seria que a eficiência fracionária poderia estar sendo influenciada pelas mudanças das características do fluido, principalmente na densidade ρ , uma vez que as mudanças nas propriedades do meio filtrante não foram observadas no presente trabalho. Nota-se também que, independentemente do tipo de filtro utilizado, para as partículas com diâmetro maiores que $5,0 \mu\text{m}$ a eficiência de coleta foi superior a 99%.

A Figura 4.39 apresenta um comparativo das eficiências de coleta dos filtros para uma pressão absoluta do sistema de 693 kPa.

Pela análise da Figura 4.39, verifica-se que o filtro metálico apresentou a menor eficiência entre os meios filtrantes estudados. Isto pode ser explicado pelas características estruturais das fibras nos filtros. No caso do filtro metálico as fibras estruturadas na forma trançada e monocamada apresentam uma menor eficiência em relação às fibras com uma

estruturção aleatória (feltros). Esta característica na estrutura do filtro metálico não permite que as partículas sejam capturadas internamente, diminuindo a eficiência de coleta do filtro. Comportamentos similares foram observados no trabalho de Theodore e Buonicore (1998). Os autores afirmaram que os feltros limpos são mais eficientes que tecidos trançados limpos, mas que estes últimos são capazes de alcançar eficiências comparáveis após uma camada de partículas ter se acumulado em sua superfície.

Em relação aos filtros não trançados (feltros) pode se verificar que o filtro que apresentou a maior eficiência foi o de celulose seguido pelo poliéster e polipropileno. Isto mostra que a estrutura mais fechada do filtro de celulose permitiu uma rápida formação da torta de filtração no período inicial, no qual a torta formada contribuiu para o aumento da eficiência do mesmo.

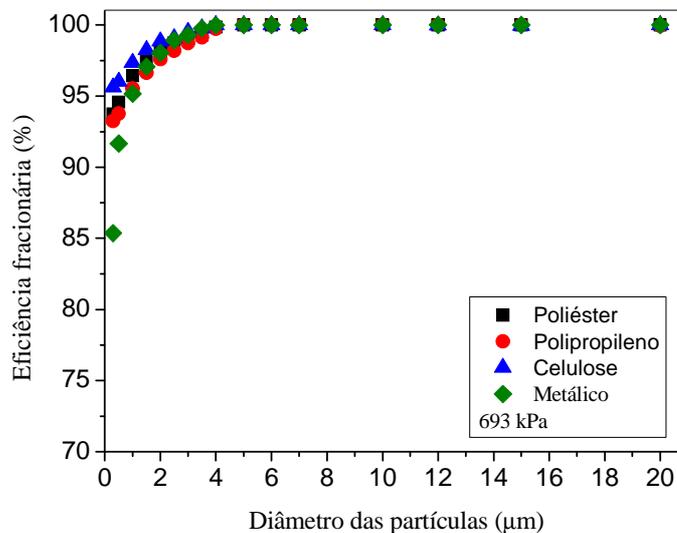


Figura 4.39: Comparativo da eficiência fracionária dos filtros na pressão do sistema de 693 kPa.

4.2.6 Comparação da eficiência de coleta experimental com os modelos da literatura

Os resultados de eficiência fracionária dos quatro meios filtrantes foram comparados com os modelos da literatura descritos no Capítulo 2. Desta forma para o mecanismo

difusional e interceptação direta foram aplicadas, respectivamente, as Equações (2.8) e (2.15) que correspondem às correlações de Liu and Ribow, (1990). Para os mecanismos de coleta inercial e gravitacional, foram utilizadas as Equações (2.14) e (2.17) propostas, respectivamente, por Landahl e Hermann (1949 apud SPURNY, 1998) e Tien (2007). O mecanismo eletroforético é importante quando as partículas são carregadas eletricamente (STEFFENS, 2007 a), e como o objetivo não foi estudar o efeito das mesmas, este mecanismo não foi inserido nos cálculos da eficiência teórica. O diâmetro das fibras utilizado para realização dos cálculos da eficiência encontra-se na Tabela 3.2.

A partir do cálculo das eficiências de coleta individuais para cada mecanismo foi possível determinar a eficiência total de coleta da fibra (η_t), conforme apresentada na Equação (2.57). Uma vez encontrada a eficiência total de coleta da fibra (η_t), o cálculo da eficiência do filtro para cada diâmetro de partícula analisada (Eficiência fracionária) foi realizada por meio da Equação (2.56). As Figuras 4.40 a 4.43 apresentam os resultados comparativos das eficiências experimentais e teóricas determinados pelas correlações citadas anteriormente.

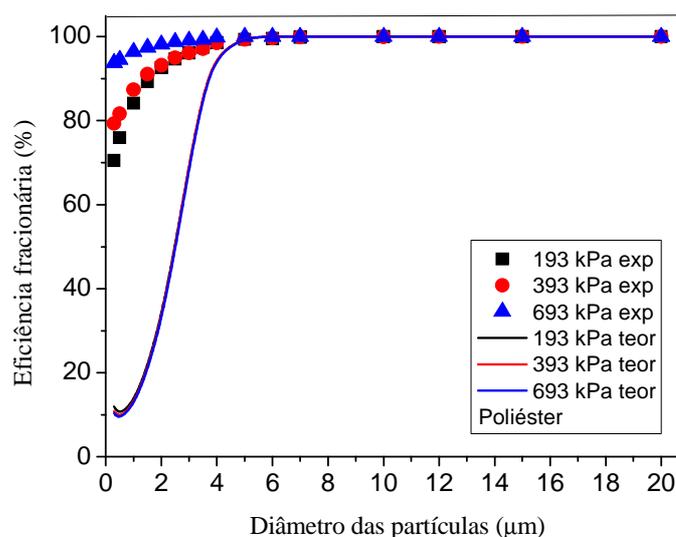


Figura 4.40: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de poliéster.

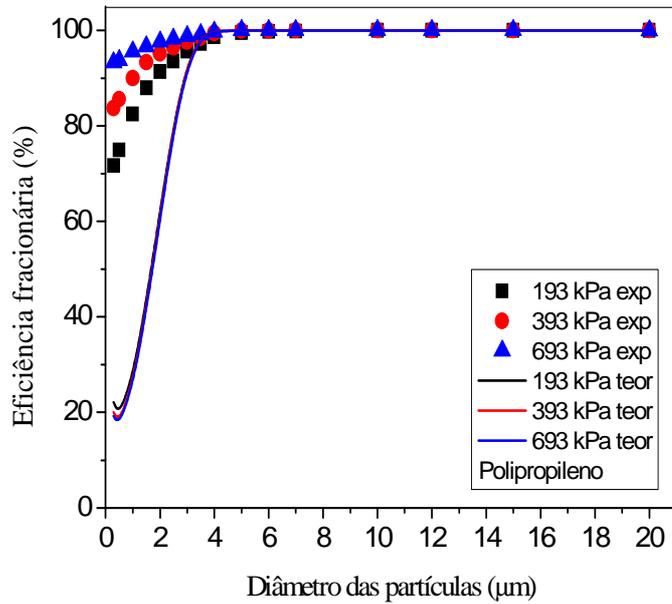


Figura 4.41: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de polipropileno.

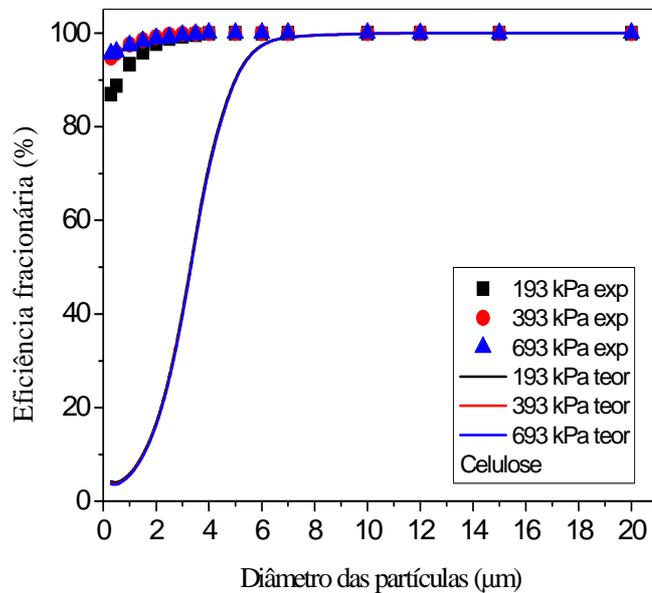


Figura 4.42: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de celulose.

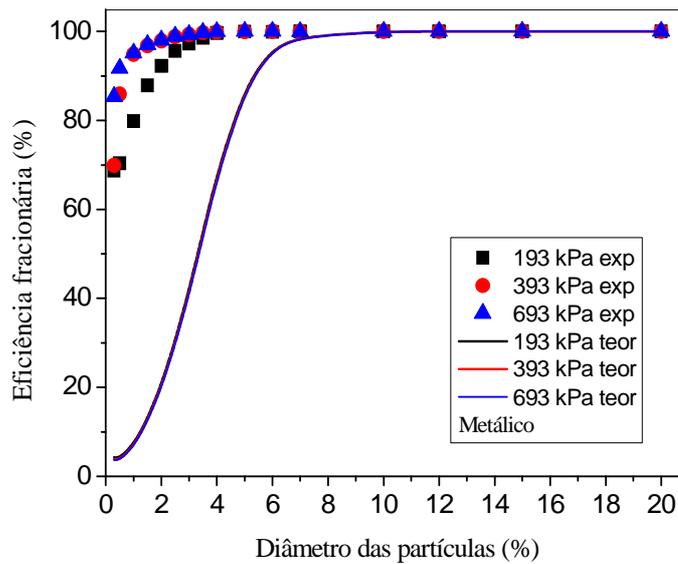


Figura 4.43: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equações 2.8, 2.14, 2.15 e 2.17) no filtro de metálico.

Pela análise das Figuras 4.40 a 4.43, observa-se que as curvas de eficiência teórica tiveram um bom ajuste apenas para partículas maiores que 5 μm . Entretanto, para as partículas menores que 5 μm , o ajuste teórico apresentou-se com um grande desvio em relação aos pontos experimentais. Uma justificativa desta discrepância seria que as correlações utilizadas para os cálculos da eficiência foram desenvolvidas considerando que as fibras dos meios filtrantes fossem homogêneas. Porém, uma análise das superfícies dos filtros estudados, observa-se que os mesmos apresentam fibras heterogêneas, exceto o filtro metálico como mostrado na Figura 3.3, no Capítulo 3. Verifica-se também que a pressão do sistema não teve influência significativa nas eficiências teóricas.

Considerando uma forte dependência entre o diâmetro das fibras com a eficiência de coleta, o uso de um único valor de diâmetro médio das fibras nas correlações não representou satisfatoriamente os dados experimentais.

A próxima etapa do trabalho consistiu em realizar um estudo comparativo entre as eficiências experimentais e a correlação proposta no trabalho de Steffens e Coury (2007 b). Os autores propuseram que o filtro era como um leito com superposição de (n) filtros, cada um composto por fibras com uma ampla faixa de tamanhos. Conseqüentemente todo o leito era visualizado como sendo um seqüência de (n) leitos de altura (L) e porosidade (ε_i), como mostrada na Figura 2.11, conforme apresentado no Capítulo 2. A porosidade ε_i do leito composto pelas fibras d_{fi} pode ser facilmente correlacionada à porosidade do filtro (ε) e calculado pela Equação (2.58). A fração das fibras dos filtros (x_i) com diâmetro (d_{fi}) foi estimada pela Equação (2.59).

A eficiência total para o leito de filtro com a superposição de (n) filtros pode ser calculada pela Equação (2.67) (Capítulo 2), que está novamente apresentada na Equação (4.2):

$$E = 1 - P_n = 1 - \exp \left[- \frac{4L}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{ti}}{\varepsilon_i d_{fi}} \right] \quad (4.2)$$

Porém, antes da utilização da Equação (4.2) foi necessário realizar a distribuição das fibras dos filtros utilizados no presente trabalho. As Figuras 4.44 a 4.47 apresentam as imagens obtidas no MEV, da seção transversal dos filtros de poliéster, de polipropileno, de celulose e do metálico. Para a realização da distribuição das fibras foram feitas análises de 5 imagens da seção transversal de cada meio filtrante e posteriormente medidas os diâmetros das fibras no programa Image-Pro Plus 7.0. As distribuições do diâmetro das fibras dos filtros de poliéster, de polipropileno, de celulose e do metálico estão apresentadas na Figura 4.48 e nas Tabelas 4.2 a 4.5.

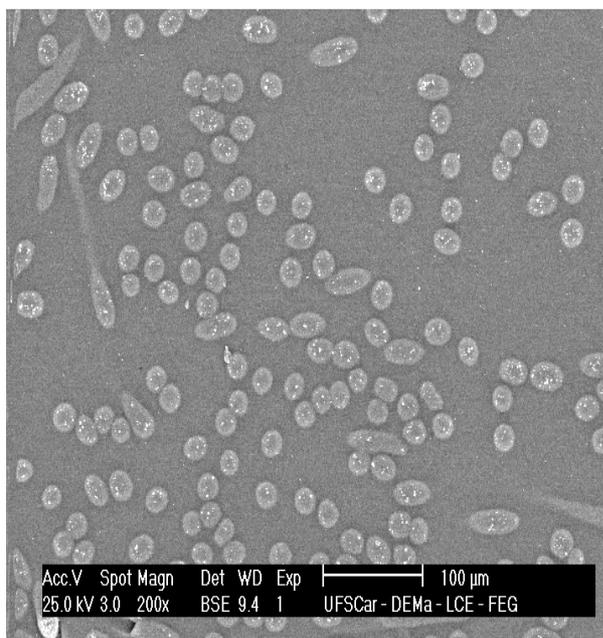


Figura 4.44: Imagem da seção transversal do filtro de poliéster.

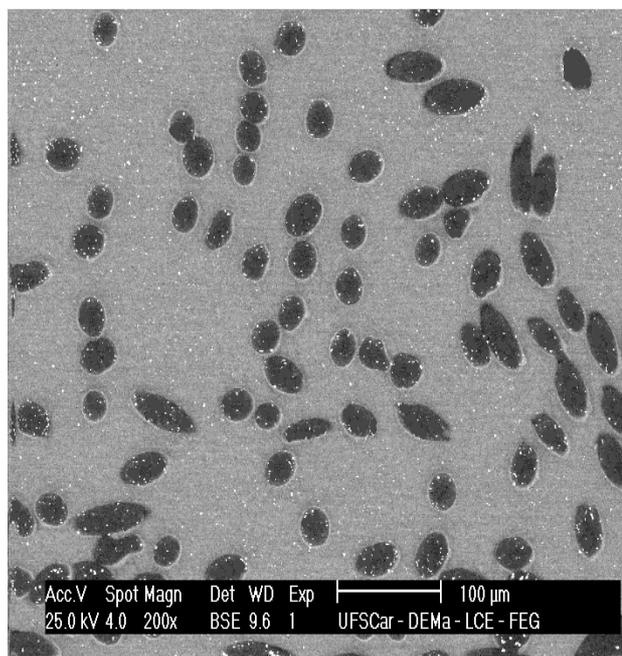


Figura 4.45: Imagem da seção transversal do filtro de polipropileno.

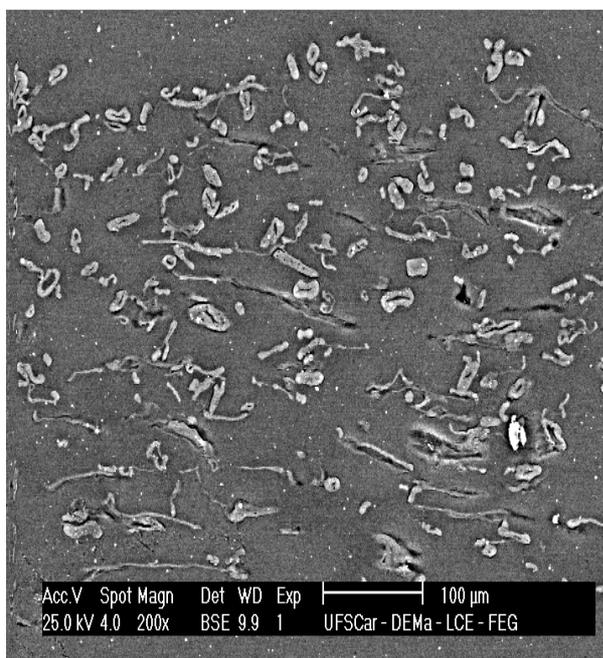


Figura 4.46: Imagem da seção transversal do filtro de celulose.

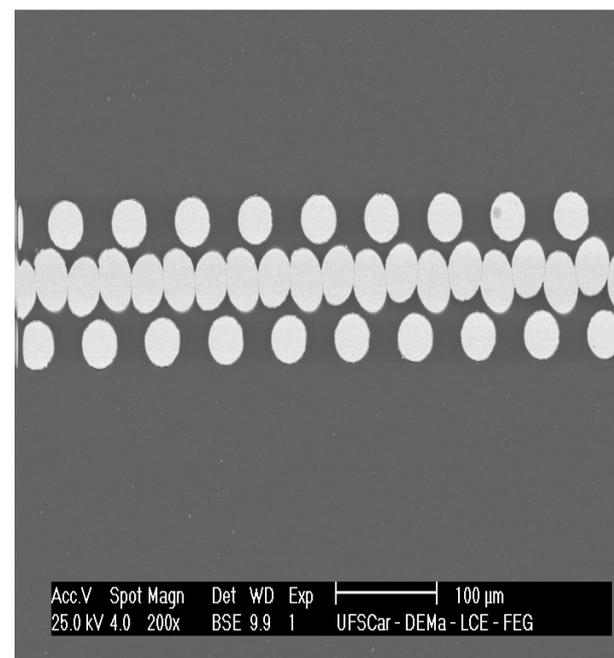


Figura 4.47: Imagem da seção transversal do filtro metálico.

Tabela 4.2: Distribuição das fibras do filtro de poliéster.

Diâmetro das fibras do filtro de poliéster (μm)	Número de fibras	Fração acumulada (x_i)	x_i	ε_i
5-10	0	0,000	0,000	1,000
10-14	90	0,131	0,131	0,977
14-16	210	0,511	0,381	0,931
16-18	163	0,846	0,335	0,940
18-20	56	0,975	0,129	0,977
20-22	10	1,000	0,025	0,995

Tabela 4.3: Distribuição das fibras do filtro de polipropileno.

Diâmetro das fibras do filtro de polipropileno (μm)	Número de fibras	Fração acumulada (x_i)	x_i	ε_i
5-10	1	0,002	0,002	0,999
10-15	22	0,091	0,088	0,978
15-18	55	0,383	0,292	0,927
18-20	52	0,700	0,318	0,921
20-22	28	0,889	0,189	0,953
22-24	15	1,000	0,111	0,972

Tabela 4.4: Distribuição das fibras do filtro de celulose.

Diâmetro das fibras do filtro de celulose (μm)	Número de fibras	Fração acumulada (x_i)	x_i	ε_i
1-3	0	0,000	0,000	1,000
3-5	98	0,059	0,059	0,987
5-8	212	0,268	0,208	0,954
8-10	119	0,429	0,162	0,964
10-15	169	0,749	0,319	0,930
15-20	95	1,000	0,251	0,945

Tabela 4.5: Distribuição das fibras do filtro metálico.

Diâmetro das fibras do filtro metálico (μm)	Número de fibras	Fração acumulada (x_i)	x_i	ε_i
20-24	0	0,000	0,000	1,000
24-26	0	0,000	0,000	1,000
26-28	6	0,039	0,039	0,983
28-30	77	0,574	0,536	0,759
30-32	37	0,850	0,275	0,876
32-34	19	1,000	0,150	0,932

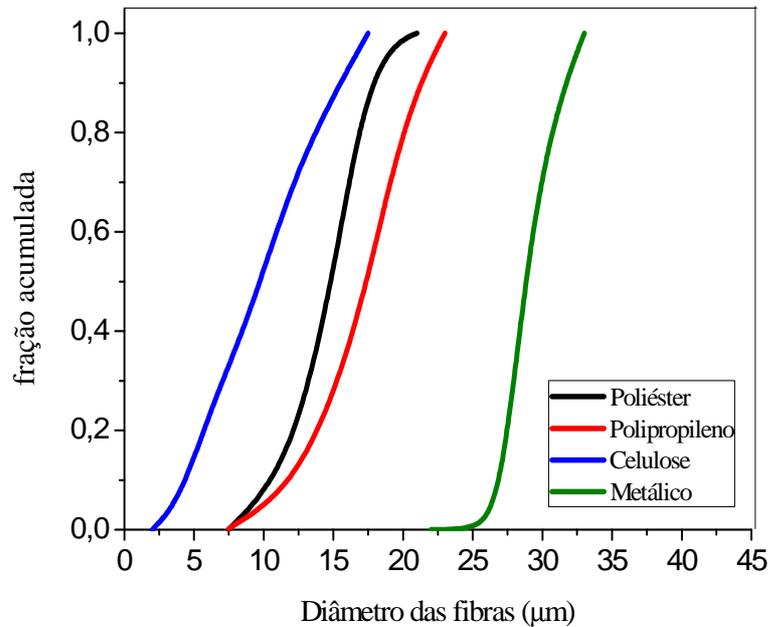


Figura 4.48: Distribuição das fibras dos filtros.

As Figuras 4.49 a 4.52 apresentam o comparativo entre eficiências experimentais e teóricas em função do diâmetro das partículas, porém agora calculada por meio da Equação (4.2) proposta por Steffens e Coury (2007 b).

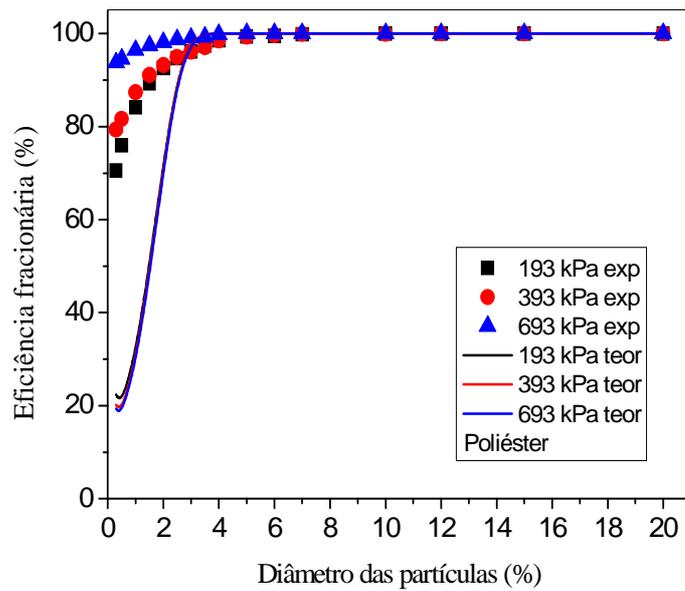


Figura 4.49: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de poliéster.

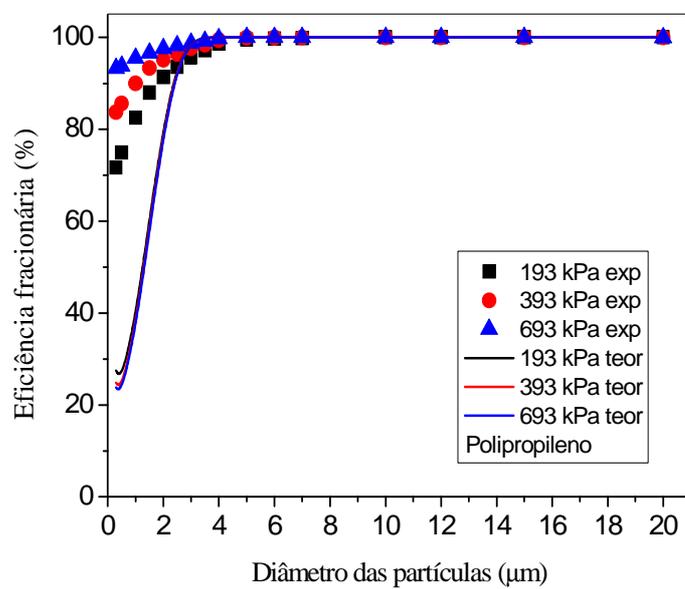


Figura 4.50: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de polipropileno.

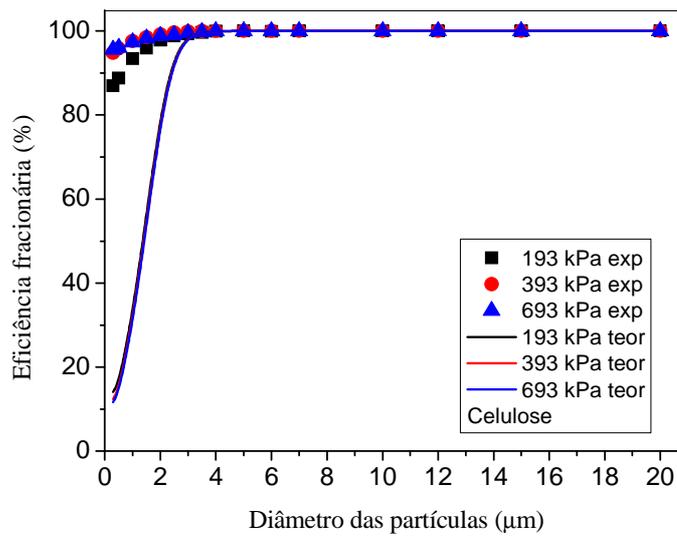


Figura 4.51: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de celulose.

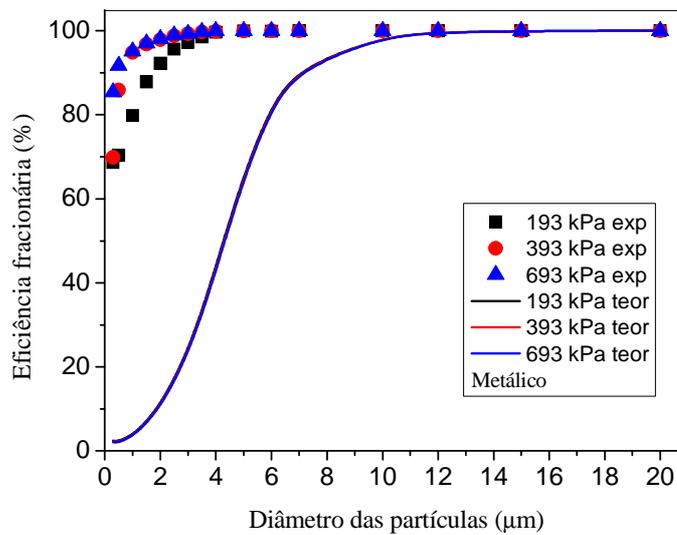


Figura 4.52: Comparativo entre as eficiências experimentais e teóricas (Equação 4.2) no filtro de metálico.

De acordo com as Figuras 4.49 a 4.51, verifica-se que as curvas de eficiência teórica apresentaram uma melhora nos resultados, conforme a teoria proposta por Steffens e Coury (2007 b). Observa-se também que a Equação (4.2) apresentou bons ajustes para partículas maiores que 2,5 μm nos filtros de poliéster, de polipropileno e de celulose.

Pela análise da Figura 4.52, nota-se que o aumento da eficiência de coleta não foi observado no filtro metálico. Era de se esperar que os resultados apresentados na Figura 4.52 fossem próximas aos encontrados na Figura 4.43, porque o filtro metálico apresenta fibras homogêneas. No entanto, verifica-se na Figura 4.52 que ocorreu uma pequena diminuição da eficiência em relação à Figura 4.43. Uma justificativa para este comportamento seria que nos cálculos realizados para a Figura 4.43 (fibras homogêneas) adotou-se um diâmetro médio de 28 μm . Porém, a partir da Tabela 4.5 observa-se que os diâmetros empregados nos cálculos da Figura 4.52 foram iguais ou superiores a 28 μm filtro metálico, diminuindo a eficiência de coleta.

Apesar da melhora observada nas Figuras 4.49 a 4.51, a Equação (4.2) não é suficientemente sensível à variação da pressão do sistema. Logo, uma nova correlação deverá ser proposta.

4.2.7 Proposta de uma correlação para eficiência de coleta

Até o momento, observa-se que correlação empregada na Equação (4.2) apresentou um aumento na eficiência de coleta de partículas, porém ainda não satisfatória em relação aos dados experimentais. O que se propõe neste trabalho será reestruturar a Equação (4.2) proposta por Steffens e Coury (2007 b), inserido o termo da pressão do sistema (P), com objetivo de avaliar o efeito da mudança de pressão na eficiência de coleta das partículas. Esta nova equação apresenta ainda dois parâmetros de ajuste A e B e a pressão atmosférica (P_{atm}), apresentada como:

$$E = 1 - \exp \left[- \ln \left(\frac{P}{P_{atm}} \right)^A - B \frac{4L}{\pi} \sum_{i=1}^n \frac{(1 - \varepsilon_i) \eta_{ii}}{\varepsilon_i d_{fi}} \right] \quad (4.3)$$

As Figuras 4.53 a 4.56 mostram o comparativo entre eficiências experimentais e teóricas em função do diâmetro das partículas, porém agora calculada pela Equação (4.3) proposta no presente trabalho.

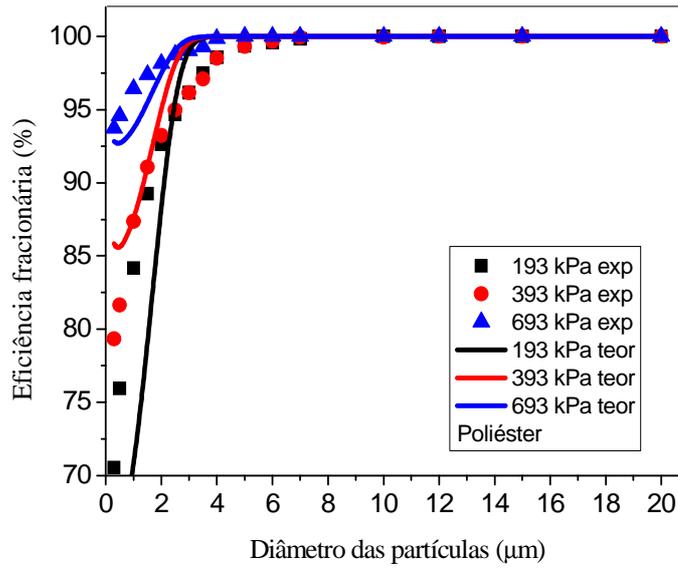


Figura 4.53: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de poliéster.

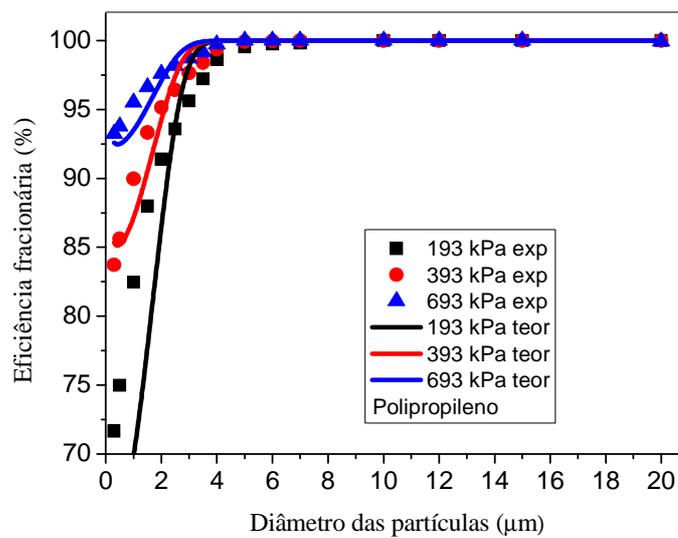


Figura 4.54: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de polipropileno.

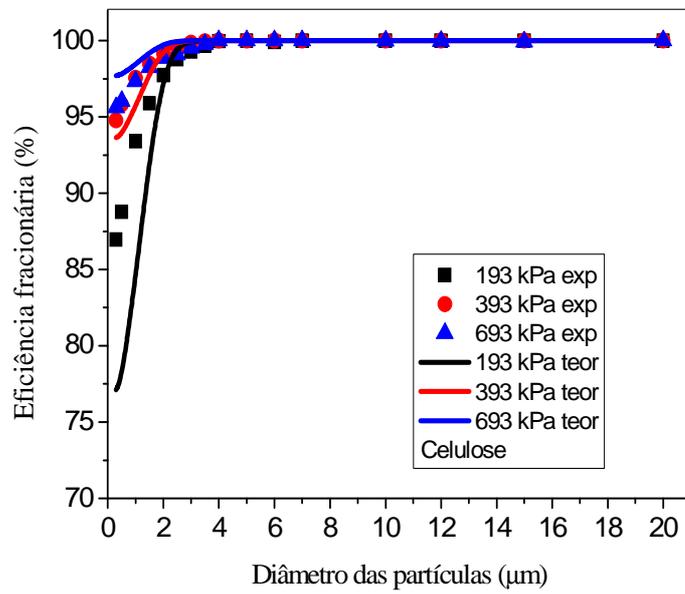


Figura 4.55: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de celulose.

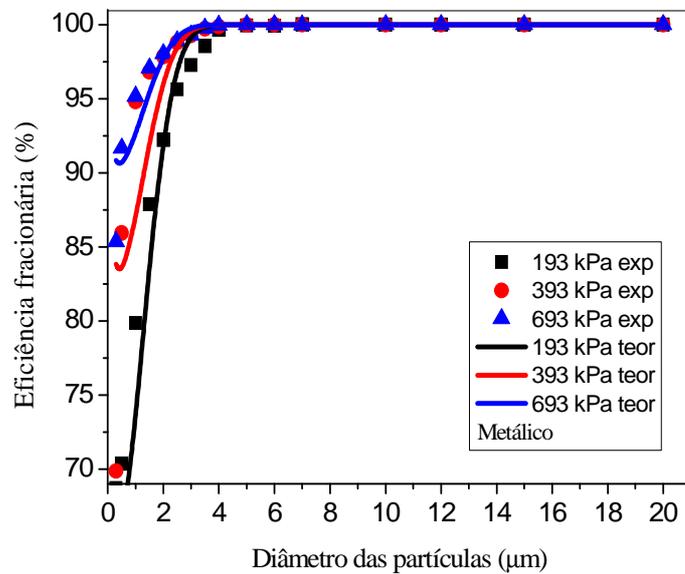


Figura 4.56: Eficiência experimental e teórica predita pela Equação (4.3) no filtro de metálico.

Pela análise das Figuras 4.53 a 4.46, observa-se que a correlação proposta pela Equação (4.3) apresentou uma boa representatividade dos resultados obtidos experimentalmente para os filtros estudados. Diante disso, os valores dos parâmetros de ajuste da Equação (4.3), para cada meio filtrante, estão apresentados a seguir:

Tabela 4.6: Valores de parâmetros de ajuste da Equação (4.3).

	MEIO FILTRANTE			
PARÂMETRO	Poliéster	Polipropileno	Celulose	Metálico
A	1,2	1,2	1,8	1,0
B	1,0	0,7	1,5	15

Os ajustes dos parâmetros apresentados neste trabalho são preliminares e devem ser objeto de estudo em trabalhos futuros.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho foi possível apresentar as seguintes conclusões:

Na permeabilidade experimental, a variação na pressão do sistema não proporcionou mudanças significativas nas constantes de permeabilidade k_1 e k_2 , no qual se pode considerar um valor constante para as pressões avaliadas;

A simulação da perda de carga utilizando o gás natural mostrou que para uma mesma velocidade de filtração a perda de carga no filtro aumentou com o aumento da pressão.

Porém, se a perda de carga fosse analisada em termos da vazão mássica de gás, observou-se que para uma mesma perda de carga no filtro o aumento da pressão permite uma maior capacidade de filtração.

O filtro de poliéster apresentou a maior capacidade de permeação e o polipropileno o menor, analisando uma mesma perda de carga.

Nos ensaios de filtração observou-se que a maior pressão do sistema apresentou a menor perda de carga no filtro para uma mesma massa de pó depositada.

Na porosidade da torta de filtração verificou-se que o aumento da pressão do sistema proporcionou um aumento nas porosidades, tornando as tortas menos resistentes ao escoamento do gás.

Em relação aos meios filtrantes observou-se que os filtros que apresentaram filtração de profundidade (no caso do poliéster e do polipropileno) tiveram a formação de tortas mais porosas.

Os cálculos de da porosidade por meio das correlações de Ergun, de Endo e de Rudnick-Happel mostraram que a de Endo foi a que melhor ajustou com os dados experimentais.

A resistência específica da torta de filtração diminuiu com a elevação da pressão.

Na eficiência fracionária para filtros limpos observou-se que o aumento da pressão do sistema proporcionou um aumento da eficiência do filtro para partículas menores que 5 μm .

Observou-se também que independentemente do tipo de filtro utilizado, as partículas com diâmetro acima de 5,0 μm apresentaram eficiência de coleta superior a 99%.

Entre os meios filtrantes, os feltros de celulose, polipropileno e poliéster (não trançados) apresentaram maiores eficiência em relação ao filtro metálico (trançado).

A determinação da eficiência teórica por meio de correlações para fibras homogêneas não tiveram um bom ajuste, para as partículas menores que 5 μm .

A determinação da eficiência teórica proposta por Steffens e Coury (2007 b) apresentou um aumento de eficiência em relação às correlações propostas para fibras homogêneas, porém não foram sensíveis as pressões.

A equação proposta neste trabalho, com a inserção do termo da pressão do sistema (P) e com os parâmetros de ajuste, apresentou uma boa representatividade dos resultados obtidos experimentalmente.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a continuidade do trabalho, as seguintes sugestões são sugeridas:

- Variação da velocidade de filtração para diferentes pressões do sistema (Pode-se obter com a diminuição da área de filtração ou aumento da vazão do compressor);
- Utilização do material particulado de óxido de ferro sintético ou natural (material particulado comumente encontrado nos gasodutos);
- Avaliação de diferentes espessuras de tortas de filtração com a variação da pressão do sistema;
- Realização de ensaios até a capacidade máxima de pressão do compressor;
- Melhoramento e busca de novos modelos para o cálculo da eficiência teórica dos filtros.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT/TB-392. Materiais têxteis-Ligamentos fundamentais de tecidos plano-Terminologia. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1991.

ABGNV (Associação Brasileira do Gás Natural Veicular) INSTITUCIONAL, 2004. O uso do GN em veículos (GNV). Disponível em: [http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/o_uso_do_gn_em_veiculos_\(gnv\).html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/o_uso_do_gn_em_veiculos_(gnv).html) (última verificação 25-08-11).

AGUIAR, M.L. **Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada**. Tese de Doutorado. PPG-EQ-UFSCar, São Carlos-SP, 1995.

AGUIAR, M.L.; COURY, J.R.; Cake formation in Fabric Filtration of Gases. **Industrial Engineering Chemical Research**. v.35, p.3673-3679, 1996.

ANP-AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2002. Disponível em: http://www.cogen.com.br/legislacao/gas/2002/PO_ANP_104_08072002.pdf (última verificação 25-08-11).

ANP-AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, 2007. Estação de distribuição de gás Atalaia. Disponível online: [http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/despachos/2007/maio/desp%20409%20-%202007.xml?fn=document-frame.htm\\$f=templates\\$3.0](http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/despachos/2007/maio/desp%20409%20-%202007.xml?fn=document-frame.htm$f=templates$3.0) (última verificação 29-10-10).

AZADI, M.; MOHEBBI, A.; SCALA, F.; SOLTANINEJAD, S. Experimental study of filtration system performance of natural gas in urban transmission and distribution network: A case study on the city of Kerman, Iran, **Fuel**. v.90, Issue 3, p.1166-1171, 2011.

BUONICORE, A.J.; DAVIS, W.T.; **Air Pollution Engineering Manual**. p.118-131. Air & Waste Management Association. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.

BURMAN, V. **Transporte dutoviário de gás natural**. Monografia do curso de especialização em engenharia de gás natural, DEQ-UFBA, Salvador-BA, 2004. Disponível online <http://www.energia.ufba.br/ceegan/Monografias/CEEGANII/Transporte%20dutovi%20e%20g%20natural.pdf> (última verificação 29-10-10).

CALVANTI, M.C.B. Ascensão do gás natural no mercado de combustíveis automotivos no Brasil, **3º Congresso Brasileiro P&D em Petróleo e Gás**, 2005. Disponível online http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0294_05.pdf (última verificação 28-10-10).

CHENG, Y.H.; TSAI, C.J. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. **Aerosol Science and Technology**, v.29, p.315-328, 1998.

CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M.E. **Bubbles, drops, and particles**. Academic Press. New York, p.380, 1978.

COURY, J.R. **Electrostatic effects in granular bed filtration in gases**. Tese de Doutorado, Cambridge University, Cambridge, U.K, 1983.

DAVY, C.A., SKOCZYLAS, F., BARNICHON, J.D., LEBON, P. Permeability of macro-cracked argillite under confinement: Gas and water testing. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.32, p.667-680, 2007.

DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. 3ª ed., Ed. Blücher, 2003.

DICKENSON, C. **Filters and Filtration Handbook**. 3ª ed. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1994.

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

DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gas cleaning**. San Diego: Academic Press, 1989, p.285.

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

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

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v.48, n.2, p.889-94, 1952.

FREITAS, N.L., GONÇALVES, J.A.S., INNOCENTINI, M. D.M., COURY, J. Development of a Double-layered ceramic filter for aerosol filtration at high-temperatures: the filter collection efficiency, **Journal of Hazardous Materials**. v.136, p.747-756, 2006.

GASBRASILIANO. Gás Natural. Disponível em: http://www.gasbrasiliano.com.br/gasnatural/o_que_e.asp (última verificação 01-05-11).

GASCAT. Tecnologia na Filtração de gás natural. Disponível online www.gascat.com.br/catalogos/FILTROS.pdf (última verificação 29-10-10).

GASENERGIA, 2006. **Material técnico sobre gás natural**. Disponível em: <http://www.gasenergia.com.br> (última verificação 01-05-11).

GASPISA. Gás natural: utilização. Disponível em: <http://www.gaspisa.com.br/gasnatural/gas-natural-utilizacao> (última verificação 25-08-11).

HARDMAN, E. Filter media selection, science or black art? **The Journal of the Filtration Society**, v.02, p. 11-14, 2001.

HEIDARYAN, E., MOGHADASI, J., RAHIMI, M. New correlations to predict natural gas viscosity and compressibility factor. **Journal of Petroleum Science and Engineering**. v.73, p.67-72, 2010.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology**: properties, behavior and measurement of airborne particles. 2. ed., New York: John Willey & Sons, 1999, p.483.

HUTTEN,I. **Handbook of Non-Woven Filter Media**, Elsevier Science & Technology Books, 2007.

INNOCENTINI, M. D.M., SALVANI, V.R., PARDO, A.R.F., PANDOLFELLI, V.C. How accurate is Darcy's Law for refractories. **American Ceramic Society Bulletin**. vol.78, p. 64-68, 1999.

INNOCENTINI, M. D.M., PANDOLFELLI, V.C. Permeability of Porous Ceramics considering the Klinkenberg and Inertial Effects. **Journal of American Ceramic Society**. vol.84, p.941-44 2001.

INNOCENTINI, M. D.M., SEPULVEDA, F., ORTEGA, F. Permeability, in M.Sheffler, P.Colombo (Eds.), **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**, p.313-340, 2005.

INNOCENTINI, M. D.M., RODRIGUES, V. P., ROMANO, R. C.O., PILEGGI, R. G., SILVA, G. M.C., COURY, J. R. Permeability optimization and performance evaluation of hot aerosol filters made using foam incorporated alumina suspension. **Journal of Hazardous Materials**. v.162, p. 212-221, 2009.

INNOCENTINI, M. D.M., TANABE, E.H., AGUIAR, M.L., COURY, J.R. High-pressure permeation behavior of fiber-based media used for natural gas filtration. Artigo em submissão, 2011.

JANKAUSKIS, J.J. **Introdução ao gás natural**. Centro de Tecnologias do Gás - SENAI - DR/RN, 1999.

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

KADOYA, K.; MATSUNAGA, N.; NAGASHIMA, A. Viscosity and thermal conductivity of dry air in the gaseous phase. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v.14 (4), p.947 – 970, 1985.

KIM, J.H.; LIANG, Y.; SAKONG, K.M.; CHOI, J.H.; BAK, Y.C. Temperature effect on the pressure drop across the cake of coal gasification ash formed on a ceramic filter, **Powder Technology**, v. 181, p. 67-73, 2008.

KIRSH, A.A.; FUCHS, N.A. Studies on fibrous filters- Pressure drops in systems of parallel cylinders. **Annals of Occupational Hygiene**.v.10, p.23-30, 1967.

LANDAHL, H; HERMANN, K. Sampling of liquid aerosols by wires, cylinders, and slides, and the efficiency of impaction of the droplets. *Journal of Colloid Science*.vol.4, 103, 1949.

LEE, K.W.; LIU, B.Y.H. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters. **Aerosol Science and Technology**. v.1, p. 147-161, 1982.

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

LIU, B.Y.H.; RUBOW, K.L. Efficiency, pressure drop and figure of merit of high efficiency fibrous and membrane filter media. **Proceedings of the 5th World Filtration Congress**, Nice, p.112-119, 1990.

LI, T. Dependence of filtration properties on stainless steel medium structure. **Filtration & Separation**. v.34, pp.265-273, 1997.

LOOSVELDT, H., LAFHAJ, Z., SKOCZYLAS, F. Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar. **Cement and Concrete Research**. v.32, pp.1357-1363, 2002.

MATHIAS, M.C.; SZKLO, A. Lessons learned from Brazilian natural gas industry reform. **Energy Policy**. v.35, p.6478-6490, 2007.

MILLER, R.W. **Flow measurement engineering handbook**. 3 ed. Boston: McGraw-Hill, 1996.

MME- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural, 2011. Disponível online http://www.mme.gov.br/spg/galerias/arquivos/publicacoes/boletim_mensal_acompanhamento_industria_gas_natural/Boletim_Gas_Natural_nr_49_abr_11.pdf (última verificação 28-10-10).

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

OSÓRIO, V.M. **Comportamento da filtração de gases em Meios Filtrantes de Celulose**. Dissertação de mestrado. PPG-EQ-UFSCar, São Carlos-SP, 2006.

PALL, 2009, Black powder removal from transmission pipelines: Diagnostics and Solutions. Disponível online: www.pall.com/pdf/FCBLACKPEN.pdf (última verificação 01-05-11).

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

PICH, J. Gas filtration theory. In: MATESSON, M.J.; ORR, C. **Filtration: Principles and practices**. 2ª ed, New York: Dekker, p.1-37, 1987.

RICCO, E.J. **Projeto e construção de bancada para ensaios de filtração de gases a alta pressão**. Dissertação de mestrado. PPG-EQ-UFSCar, São Carlos, 2009.

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil**. 2. ed., São Paulo: Aduaneiras, 2001.

RUDNICK, S. N., FIRST, M. W. Proceedings of the 71st **Annual Meeting of the Air Pollution Control Association**, Paper No. 78- 62.7., Houston, Texas, 1978.

SANTOS, E.M. **Gás Natural**: Estratégias para uma energia nova no Brasil. 1º ed. São Paulo: Annablume, 2002.

SAMBAER, W., ZATLOUKAL, M., KIMMER, D. 3D modeling of filtration process via polyurethane nanofiber based nonwoven filters prepared by electrospinning process. **Chemical Engineering Science**.vol 66, p.613–623, 2011.

SCHWOB, M.R.V.; JR, M.H.; SZKLO, A. Technical potential for developing natural gas use in the Brazilian red ceramic industry, **Applied Energy**.vol. 86, p. 1524-1531, 2009.

SEGUIN, D.; A. MONTILLET, A.; COMITI, J. Experimental characterization of flow regimes in various porous media–I: Limit of laminar flow regime, **Chemical Engineering Science**. vol.53 (21), p.3751–3761, 1998 a.

SEGUIN, D.; A. MONTILLET, A.; COMITI, J.; HUET, F. Experimental characterization of flow regimes in various porous media–II: Transition to turbulent regime, **Chemical Engineering Science**. vol. 53 (22), p. 3897–3909, 1998 b.

SEVILLE, J.P.K. **Gas Cleaning in Demanding Applications**. Blackie Academia & Professional. School of Chemical Engineering; The University of Birmingham, UK, 1º edição, 1997.

SILVA, C.R.N.; NEGRINI, V.S.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. Influence of gas velocity on the cake formation and detachment. **Powder Technolgy**. v.101, p.165-172, 1999.

SILVA J.M., CAVALCANTI, E., VILLELA, T., PIMENTA, G. Monitoramento da Corrosão Interna de Dutos e Instalações de Gás Natural – Estado da Arte. In: **5º CONTEQ, XXI CONBRASCORR**, Trabalho 109, São Paulo, Setembro 2001.

SILVA J.M.; VILLELA, T.; CAVALCANTI, E.; COBUCCI, J.C.S.; PIMENTA, G.; FERREIRA, PA. Avaliação da corrosão interna de um duto de gás natural, In: **6º COTEQ – conferência sobre Tecnologia de Equipamentos e 22º CONBRASCORR – Congresso Brasileiro de Corrosão**, Salvador – BA, 2002 a. Disponível online <http://www.aende.org.ar/sitio/biblioteca/material/PDF/COTE231.PDF> (última verificação 29-10-10).

SILVA J.M.; VILLELA, T.; CAVALCANTI, E.; COBUCCI, J.C.S.; PIMENTA, G.; FERREIRA, PA.; COELHO, J.F. Caracterização de resíduos sólidos colhidos em dutos de gás natural – parte II, In: **6º COTEQ – conferência sobre Tecnologia de Equipamentos e 22º CONBRASCORR – Congresso Brasileiro de Corrosão**, Salvador – BA, 2002 b. Disponível online: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd48/gasnatural.pdf> (última verificação 29-10-10).

SONG, C.B.; PARK, H.S.; LEE, K.W. Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles. **Powder Technology**, v.163, n.3, p.152-159, 2006.

SPURNY, K.R. **Advances in aerosol filtration**. Florida: CRC Press LLC, 1998, p.533.

STEFFENS, J. **Desempenho de filtros fibrosos operando na remoção de partículas nanométricas de aerossóis**. Tese de doutorado. PPG-EQ-UFSCar, São Carlos-SP, 2007 a.

STEFFENS, J.; COURY, J.R. Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles II- Heterogeneous fibers. **Separation and Purification Technology**. vol 58, p.106-112, 2007 b.

STENHOUSE, J.I.T. Filtration of air by fibrous filters. **Filtration&Separation**, p.269-274, 1975.

TANABE, E.H.; PASCHOAL, P.A.; AGUIAR, M.L. Tecidos que removem partículas. **Revista Meio Filtrante**. 30° ed., Jan- Fev, 2008.

TANIKAWA, W.; SHIMAMOTO, T. Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**. v.46, p. 229-238, 2009.

TBG-TRANSPORTADORA BRASILIANA GASODUTO BOLÍVIA-BRASIL S.A.(2010). Gasoduto Brasil-Bolívia- Informações Técnicas do lado Brasileiro. Disponível online http://www.tbq.com.br/portalTBGWeb/ShowProperty/BEA%20Repository/Imagem/Media/carrac_fis (última verificação 29-10-10).

THEODORE, L.; BUONICORE, A.J. **Air pollution control equipment – particulates**, Vol. 01, CRC Press, Flórida, 1988.

TSOCHATZIDIS, N.A.; MAROULIS, K.E.; Methods help remove black powder from gas pipelines. **Oil & Gas Journal**. v. 105(10), p. 1 – 9, 2007.

TIEN,C. **Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols**, Butterworths, USA, 2007.

ULUSOY,U. Application of ANOVA to image analysis results of talc particles produced by different milling. **Powder Technology**. v.188, p.133-138, 2008.

WILLEKE, K.; BARON, P.A. **Aerosol Measurementet**: principles, techniques, and applications. New York: Van Nostrand Reinhold, 1993. p.876.

APÊNDICE

A1) PERMEABILIDADE DOS MEIOS FILTRANTES

A seguir estão apresentadas as réplicas e das tréplicas das curvas de permeação. A partir destes resultados foram determinados a média dos coeficientes de permeabilidade (k_1 e k_2) a partir das três curvas de permeação para cada meio filtrante.

Réplicas dos experimentos de permeação

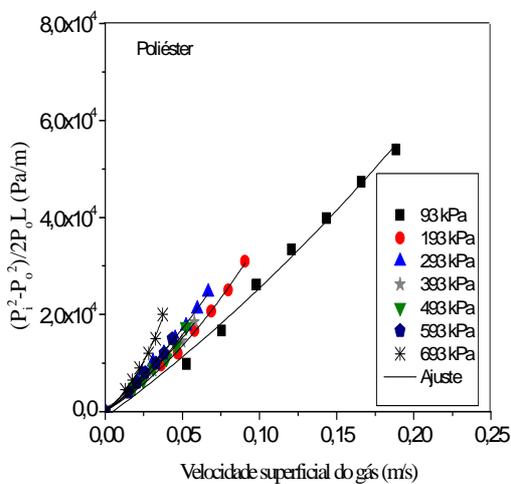


Figura A1: Réplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de poliéster.

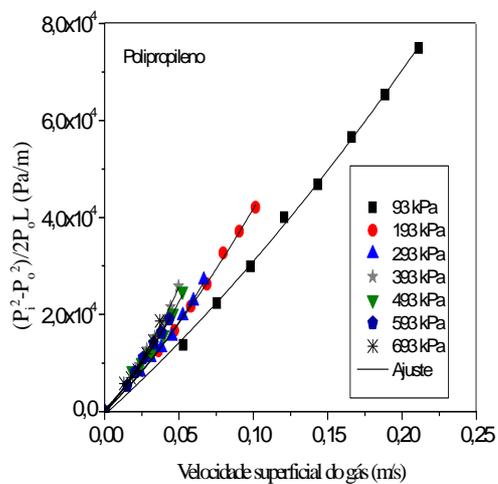


Figura A.2: Réplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de polipropileno.

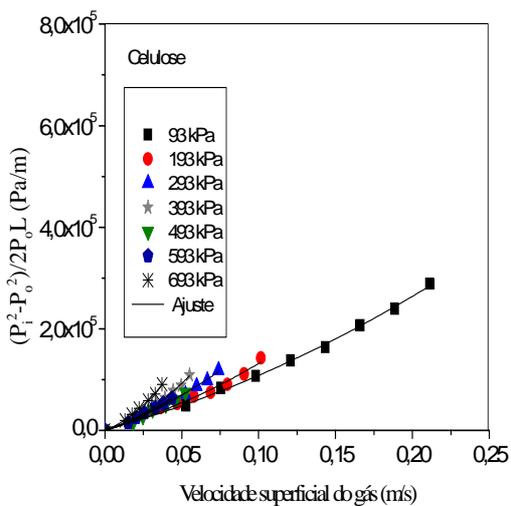


Figura A.3: Réplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de celulose.

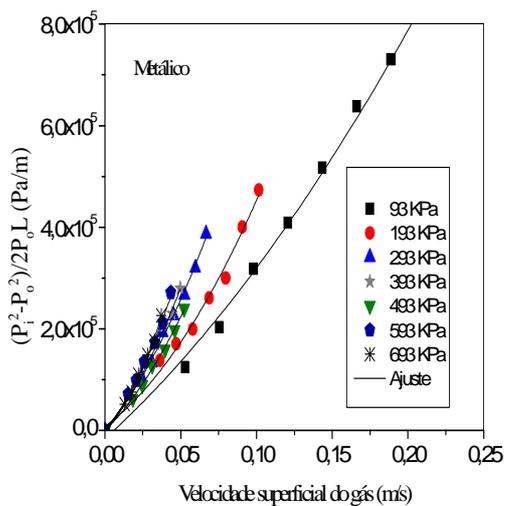


Figura A.4: Réplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro metálico.

Tréplicas dos experimentos de permeação

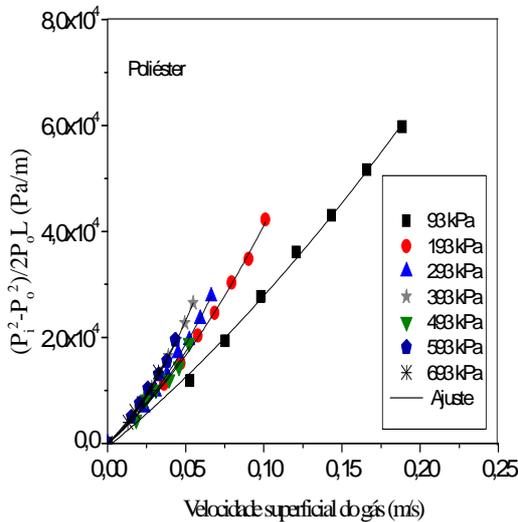


Figura A.5: Tréplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de poliéster.

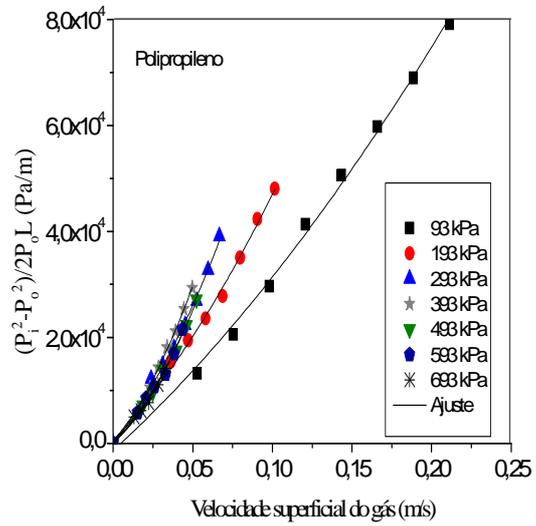


Figura A.6: Tréplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de polipropileno.

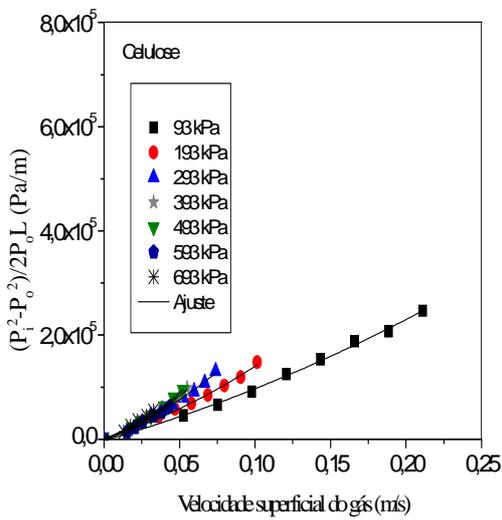


Figura A.7: Tréplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro de celulose.

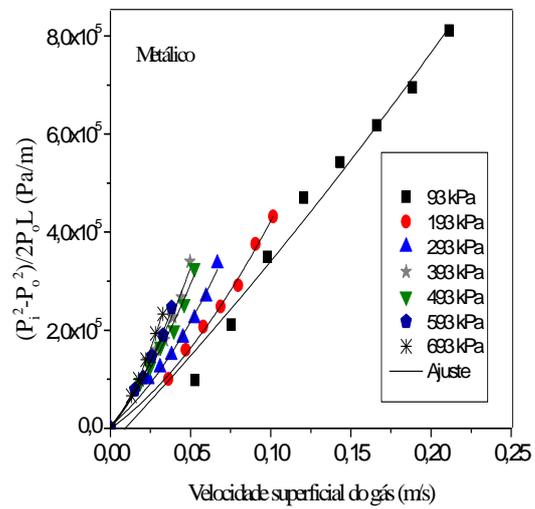


Figura A.8: Tréplica da curva de perda de carga em função da velocidade superficial no filtro metálico.

A seguir estão apresentados todos os dados da perda de carga em função da velocidade de superficial de filtração das Figuras A.1 a A.8 nas Tabelas representadas por A1 a A8.

Tabela A1: Dados da Figura A1 para o filtro de poliéster.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	9801,0	0,036	9600,5	0,024	8000,2
0,075	16703,0	0,047	12050,8	0,031	10200,4
0,098	26157,4	0,058	16701,4	0,038	12000,5
0,121	33412,1	0,069	20702,2	0,045	15100,8
0,143	39817,1	0,080	25053,3	0,052	17651,1
0,166	47324,2	0,091	31005,0	0,060	21151,5
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,018	4500,1	0,018	5000,1	0,015	4000,0
0,023	6000,1	0,025	6500,1	0,021	6000,1
0,031	8500,2	0,031	9000,2	0,026	8000,1
0,039	11500,3	0,040	11000,2	0,033	10000,2
0,050	14500,5	0,046	13500,4	0,038	12000,2
0,058	18500,9	0,052	17500,6	0,044	15000,4
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	4500,0				
0,018	6500,1				
0,022	9000,1				
0,028	12000,2				
0,033	15000,3				
0,037	20000,6				

Tabela A2: Dados da Figura A2 para o filtro de polipropileno.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	13771,9	0,036	12501,1	0,024	8154,1
0,075	22353,2	0,047	16694,2	0,031	11115,9
0,098	29935,7	0,058	21657,0	0,038	13154,6
0,121	40022,5	0,069	26273,9	0,045	15501,1
0,143	46838,5	0,080	32699,5	0,052	19771,0
0,166	56583,4	0,091	37163,2	0,060	22810,0
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,023	9654,2	0,018	8423,3	0,015	5346,2
0,028	12769,8	0,025	10154,1	0,021	8154,0
0,034	15385,4	0,031	11961,9	0,026	11077,2
0,039	18616,5	0,040	15808,4	0,033	14038,9
0,044	21540,0	0,046	20270,3	0,038	16269,8
0,050	25809,9	0,052	24809,3	0,044	19039,3
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	5769,3				
0,018	6961,6				
0,022	8500,1				
0,028	11846,4				
0,033	14538,9				
0,037	18654,5				

Tabela A3: Dados da Figura A3 para o filtro de celulose.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	49007,8	0,036	45003,2	0,031	43001,9
0,075	83856,2	0,047	52837,7	0,038	50002,6
0,098	107370,7	0,058	67673,8	0,045	61170,5
0,121	138061,8	0,069	75175,5	0,052	71505,2
0,143	164087,3	0,080	90846,2	0,060	87007,8
0,166	207139,1	0,091	111352,7	0,067	98676,7
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,023	29334,0	0,018	16666,8	0,015	15500,1
0,028	38834,5	0,025	28333,8	0,021	25333,7
0,034	53335,5	0,031	41001,0	0,026	34667,3
0,039	64003,1	0,040	51168,3	0,033	44834,4
0,044	78338,0	0,046	60002,2	0,038	53668,1
0,050	88672,7	0,052	75003,4	0,044	63335,4
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	19833,5				
0,018	31667,1				
0,022	43667,5				
0,028	59001,5				
0,033	71835,6				
0,037	90670,2				

Tabela A4: Dados da Figura A4 para o filtro metálico.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	124679,3	0,036	138007,4	0,024	106669,6
0,075	203366,9	0,047	170678,0	0,031	133337,9
0,098	318082,1	0,058	199348,8	0,038	193342,9
0,121	408802,2	0,069	260693,2	0,045	226679,8
0,143	517550,6	0,080	300035,1	0,052	266684,9
0,166	637663,1	0,091	400062,4	0,060	320026,3
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,018	64667,5	0,018	62667,3	0,015	71334,0
0,023	106668,8	0,025	90001,2	0,021	98667,9
0,028	134003,4	0,031	128002,5	0,026	134669,0
0,034	170672,2	0,040	160003,9	0,033	173337,1
0,039	206674,8	0,046	198006,0	0,038	212005,7
0,044	230010,1	0,052	240008,8	0,044	271342,7
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	52000,3				
0,018	75333,9				
0,022	110001,3				
0,028	148669,1				
0,033	176670,0				
0,037	226672,2				

Tabela A5: Dados da Figura A5 para o filtro de poliéster.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	11851,5	0,036	11250,7	0,024	6800,2
0,075	19354,1	0,047	15151,2	0,031	9800,3
0,098	27708,4	0,058	20352,2	0,038	13000,6
0,121	36114,2	0,069	24653,2	0,045	17001,0
0,143	43020,2	0,079	30354,8	0,052	19501,3
0,166	51629,0	0,090	34856,3	0,059	23501,9
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,023	8200,2	0,018	4500,0	0,015	5000,0
0,028	10500,3	0,025	8300,1	0,020	7500,1
0,034	13000,4	0,031	10200,2	0,026	10350,2
0,039	16500,7	0,039	12100,3	0,033	13000,3
0,044	19501,0	0,046	14500,4	0,038	15500,4
0,049	22701,3	0,052	19000,7	0,043	19500,6
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	4000,0				
0,018	6000,1				
0,022	7500,1				
0,028	10000,1				
0,033	13500,3				

Tabela A6: Dados da Figura A6 para o filtro de polipropileno.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	13194,8	0,036	15386,2	0,024	12193,0
0,075	20544,4	0,047	19464,1	0,031	14808,7
0,098	29666,2	0,058	23580,7	0,038	17963,0
0,121	41370,2	0,069	27812,9	0,045	22348,4
0,143	50612,9	0,080	35046,8	0,052	26926,3
0,166	59819,5	0,091	42319,8	0,060	32735,5
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,023	10538,8	0,018	7154,0	0,015	5769,3
0,028	14308,4	0,025	9577,2	0,021	8461,7
0,034	18154,9	0,031	13846,7	0,026	10769,5
0,039	21155,3	0,040	17500,8	0,033	13077,3
0,044	25386,8	0,046	22309,0	0,038	16923,7
0,050	29349,0	0,052	27194,3	0,044	21539,5
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	5000,0				
0,018	6153,9				
0,022	7692,4				
0,028	11077,2				
0,033	14115,8				

Tabela A7: Dados da Figura A7 para o filtro de celulose.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	45673,4	0,036	43336,3	0,031	45002,1
0,075	65680,7	0,047	58005,2	0,038	56670,0
0,098	90860,1	0,058	68674,0	0,045	67338,0
0,121	124717,1	0,069	84177,7	0,052	79506,5
0,143	152909,2	0,080	102849,8	0,060	91675,3
0,166	188281,6	0,091	118521,9	0,067	108345,4
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,023	32167,5	0,018	23333,7	0,015	14333,4
0,028	41501,3	0,025	35000,7	0,021	22166,9
0,034	49835,2	0,031	45001,2	0,026	33167,2
0,039	59669,4	0,040	63335,8	0,033	44667,7
0,044	66836,7	0,046	80003,9	0,038	51668,0
0,050	81838,5	0,052	95005,5	0,044	62335,3
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	15000,1				
0,018	26000,3				
0,022	36000,6				
0,028	45000,9				
0,033	54834,6				

Tabela A8: Dados da Figura A8 para o filtro metálico.

P=93 kPa		P=193 kPa		P=293 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,053	98007,8	0,036	100003,9	0,024	100002,6
0,075	211369,6	0,047	160010,0	0,031	124003,9
0,098	349432,4	0,058	206683,3	0,038	149339,1
0,121	469512,1	0,069	247357,2	0,045	184675,4
0,143	542238,5	0,080	291366,4	0,052	224012,9
0,166	616975,4	0,091	375388,3	0,060	268018,4
P=393 kPa		P=493 kPa		P=593 kPa	
v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)	v(m/s)	P(Pa)
0	0	0	0	0	0
0,023	140003,7	0,018	93334,7	0,015	78667,5
0,028	160004,9	0,025	126669,1	0,021	103334,7
0,034	180006,2	0,031	166670,9	0,026	146669,4
0,039	226676,5	0,040	200006,1	0,033	190004,6
0,044	267347,0	0,046	253343,1	0,038	246674,4
0,050	340022,1	0,052	326682,9		
P=693 kPa					
v(m/s)	P(Pa)				
0	0				
0,013	66667,1				
0,018	100001,1				
0,022	140002,1				
0,028	193337,4				
0,033	233339,2				

Os valores calculados do número de Re_f , do número de Fo e as porcentagens das contribuições viscosas ($\Delta P_{\text{viscoso}}$) e inerciais ($\Delta P_{\text{inercial}}$), das Figuras 4.5 a 4.8, estão apresentados nas Tabelas A.9 a A.12.

Tabela A.9: Valores de Re_f , Fo , ($\Delta P_{\text{viscoso}}$) e ($\Delta P_{\text{inercial}}$) no filtro de poliéster.

FILTRO DE POLIÉSTER									
P=93 kPa					P=193 kPa				
v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,053	0,14	0,10	88	12	0,036	0,26	0,14	79	21
0,075	0,20	0,14	83	17	0,047	0,34	0,18	75	25
0,098	0,27	0,18	79	21	0,058	0,41	0,22	71	29
0,121	0,33	0,22	75	25	0,069	0,49	0,26	67	33
0,143	0,39	0,27	72	28	0,080	0,57	0,30	64	36
0,166	0,45	0,31	69	31	0,091	0,64	0,34	61	39
0,189	0,51	0,35	66	34	0,101	0,72	0,38	58	42
P=293 kPa					P=393 kPa				
v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,024	0,15	0,14	87	13	0,023	0,12	0,18	89	11
0,031	0,20	0,18	84	16	0,031	0,16	0,24	86	14
0,038	0,24	0,22	81	19	0,039	0,20	0,30	83	17
0,045	0,29	0,26	78	22	0,050	0,25	0,38	80	20
0,052	0,33	0,30	75	25	0,058	0,29	0,44	77	23
0,060	0,38	0,34	73	27	0,066	0,33	0,51	75	25
0,067	0,42	0,38	70	30					
P=493 kPa					P=593 kPa				
v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,018	0,28	0,18	78	22	0,015	0,23	0,18	81	19
0,025	0,38	0,24	73	27	0,021	0,31	0,24	76	24
0,031	0,47	0,30	68	32	0,026	0,39	0,30	72	28
0,040	0,60	0,38	62	38	0,033	0,50	0,38	67	33
0,046	0,70	0,44	59	41	0,038	0,58	0,44	63	37
0,052	0,80	0,50	56	44	0,044	0,66	0,50	60	40
P=693 kPa									
v_s (m/s)	F_o	R_{ef}	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$					
0,013	0,50	0,18	67	33					
0,018	0,67	0,24	60	40					
0,022	0,85	0,30	54	46					
0,028	1,08	0,38	48	52					
0,033	1,25	0,44	44	56					

Tabela A.10: Valores de Re_f , F_o , $(\Delta P_{\text{viscoso}})$ e $(\Delta P_{\text{inercial}})$ no filtro de polipropileno.

FILTRO DE POLIPROPILENO									
P=93 kPa					P=193 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,053	0,14	0,10	88	12	0,036	0,09	0,14	91	9
0,075	0,20	0,15	84	16	0,047	0,12	0,19	89	11
0,098	0,26	0,19	80	20	0,058	0,15	0,23	87	13
0,121	0,32	0,24	76	24	0,069	0,18	0,27	85	15
0,143	0,37	0,28	73	27	0,080	0,21	0,32	83	17
0,166	0,43	0,33	70	30	0,091	0,23	0,36	81	19
0,189	0,49	0,37	67	33	0,102	0,26	0,40	79	21
0,211	0,55	0,41	64	36					
P=293 kPa					P=393 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,024	0,18	0,14	84	16	0,023	0,18	0,19	84	16
0,031	0,24	0,19	81	19	0,028	0,23	0,23	82	18
0,038	0,30	0,23	77	23	0,034	0,27	0,27	79	21
0,045	0,35	0,27	74	26	0,039	0,31	0,31	76	24
0,052	0,41	0,32	71	29	0,044	0,35	0,36	74	26
0,060	0,46	0,36	68	32	0,050	0,40	0,40	72	28
0,067	0,52	0,40	66	34	0,055	0,44	0,44	69	31
P=493 kPa					P=593 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,014	0,29	0,14	78	22	0,015	0,09	0,18	92	8
0,018	0,37	0,18	73	27	0,021	0,12	0,25	89	11
0,023	0,46	0,23	69	31	0,026	0,15	0,31	87	13
0,027	0,54	0,27	65	35	0,033	0,20	0,40	84	16
0,031	0,63	0,31	61	39	0,038	0,23	0,46	81	19
0,035	0,71	0,35	58	42	0,044	0,26	0,52	79	21
P=693 kPa									
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$					
0,013	0,16	0,18	86	14					
0,018	0,21	0,25	82	18					
0,022	0,27	0,31	79	21					
0,028	0,34	0,40	74	26					
0,033	0,40	0,46	72	28					

Tabela A.11: Valores de Re_f , F_o , $(\Delta P_{\text{viscoso}})$ e $(\Delta P_{\text{inercial}})$ no filtro de celulose.

FILTRO DE CELULOSE									
P=93 kPa					P=193 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,053	0,21	0,09	82	18	0,036	0,24	0,12	81	19
0,075	0,31	0,12	77	23	0,047	0,31	0,16	76	24
0,098	0,40	0,16	72	28	0,058	0,38	0,20	72	28
0,121	0,49	0,20	67	33	0,069	0,46	0,23	69	31
0,143	0,58	0,24	63	37	0,080	0,53	0,27	65	35
0,166	0,67	0,27	60	40	0,091	0,60	0,31	63	37
0,189	0,76	0,31	57	43	0,102	0,67	0,34	60	40
0,211	0,85	0,35	54	46					
P=293 kPa					P=393 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,024	0,16	0,12	86	14	0,018	0,12	0,12	89	11
0,031	0,21	0,16	83	17	0,023	0,16	0,16	87	13
0,038	0,26	0,19	80	20	0,028	0,19	0,19	84	16
0,045	0,31	0,23	77	23	0,034	0,23	0,23	82	18
0,052	0,35	0,27	74	26	0,039	0,26	0,26	79	21
0,060	0,40	0,30	71	29	0,050	0,33	0,34	75	25
0,067	0,45	0,34	69	31					
P=493 kPa					P=593 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,014	0,37	0,12	73	27	0,012	0,22	0,12	82	18
0,018	0,48	0,16	68	32	0,015	0,29	0,16	78	22
0,025	0,64	0,21	61	39	0,021	0,39	0,21	72	28
0,031	0,81	0,26	55	45	0,026	0,49	0,26	67	33
0,040	1,03	0,34	49	51	0,033	0,62	0,34	62	38
					0,038	0,72	0,39	58	42
					0,044	0,82	0,44	55	45
P=693 kPa									
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$					
0,013	0,33	0,16	75	25					
0,018	0,45	0,21	69	31					
0,022	0,56	0,26	64	36					
0,028	0,72	0,34	58	42					
0,033	0,83	0,39	55	45					
0,037	0,95	0,44	51	49					

Tabela A.12: Valores de Re_f , F_o , $(\Delta P_{\text{viscoso}})$ e $(\Delta P_{\text{inercial}})$ no filtro metálico.

FILTRO METÁLICO									
P=93 kPa					P=193 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,053	0,09	0,16	92	8	0,036	0,15	0,23	87	13
0,075	0,13	0,22	88	12	0,047	0,19	0,30	84	16
0,098	0,17	0,29	85	15	0,058	0,24	0,37	81	19
0,132	0,23	0,39	81	19	0,069	0,28	0,43	78	22
0,155	0,27	0,46	79	21	0,080	0,33	0,50	75	25
0,177	0,31	0,52	76	24	0,091	0,37	0,57	73	27
0,200	0,35	0,59	74	26	0,101	0,42	0,64	71	29
P=293 kPa					P=393 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,031	0,16	0,29	86	14	0,018	0,32	0,22	76	24
0,038	0,19	0,36	84	16	0,023	0,42	0,29	71	29
0,045	0,23	0,43	81	19	0,028	0,51	0,36	66	34
0,052	0,27	0,49	79	21	0,034	0,61	0,42	62	38
0,060	0,30	0,56	77	23	0,039	0,70	0,49	59	41
0,067	0,34	0,63	75	25	0,044	0,80	0,56	56	44
0,074	0,38	0,70	73	27					
P=493 kPa					P=593 kPa				
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$	v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$
0,014	0,15	0,22	87	13	0,015	0,18	0,29	85	15
0,018	0,19	0,29	84	16	0,021	0,25	0,39	80	20
0,025	0,26	0,39	80	20	0,026	0,31	0,49	76	24
0,031	0,32	0,49	76	24	0,033	0,39	0,62	72	28
0,040	0,41	0,62	71	29	0,038	0,46	0,72	69	31
0,046	0,48	0,72	68	32	0,044	0,52	0,82	66	34
P=693 kPa									
v_s (m/s)	F_o	Re_f	$\Delta P_{\text{viscoso}}$	$\Delta P_{\text{inercial}}$					
0,013	0,50	0,29	67	33					
0,018	0,68	0,39	60	40					
0,022	0,85	0,49	54	46					
0,028	1,08	0,62	48	52					
0,033	1,26	0,72	44	56					
0,037	1,43	0,82	41	59					

B2) ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

A seguir estão apresentadas as curvas de perda de carga (ΔP) em função do tempo de filtração para os meios filtrantes estudados. A perda de carga máxima admitida no filtro foi de aproximadamente de 1100 Pa.

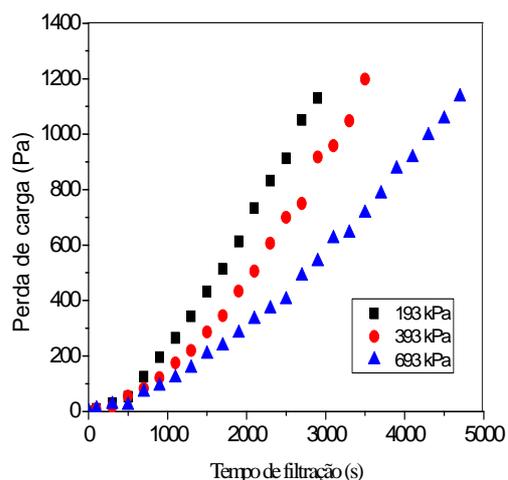


Figura B.1: Curvas de perda de carga em função do tempo de filtração no filtro de poliéster.

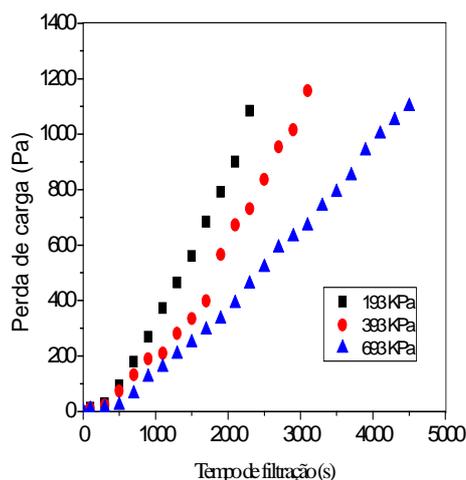


Figura B.2: Curvas de perda de carga em função do tempo de filtração no filtro de polipropileno.

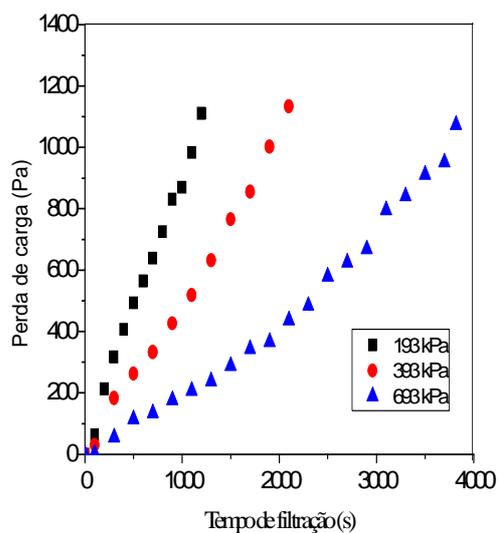


Figura B.3: Curvas de perda de carga em função do tempo de filtração no filtro de celulose.

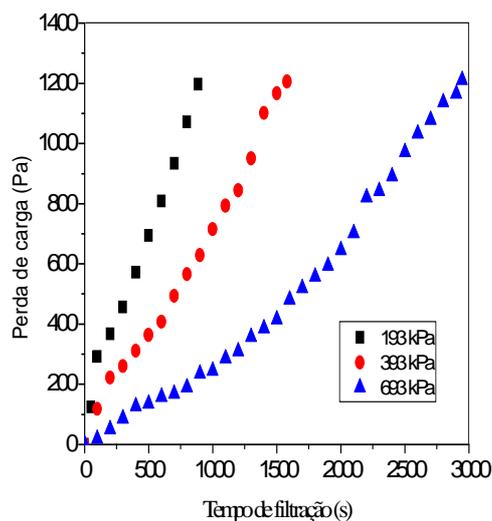


Figura B.4: Curvas de perda de carga em função do tempo de filtração no filtro metálico.

Os valores da perda de carga em função do tempo de filtração das Figuras B.1 a B.4 estão apresentadas nas Tabelas B.1 a B.4.

Tabela B.1: Dados da Figura B.1 para o filtro de poliéster.

POLIÉSTER					
P=193 kPa		P=393 kPa		P=693 kPa	
Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)
0	0	0	0	0	0
100	9	100	9	100	9
300	29	300	17	300	25
500	53	500	55	500	22
700	125	700	83	700	70
900	195	900	122	900	91
1100	265	1100	175	1100	121
1300	343	1300	220	1300	156
1500	432	1500	286	1500	207
1700	515	1700	345	1700	237
1900	613	1900	434	1900	282
2100	733	2100	506	2100	332
2300	832	2300	606	2300	370
2500	913	2500	700	2500	403
2700	1051	2700	750	2700	489
2900	1131	2900	918	2900	541
		3100	958	3100	623
		3300	1048	3300	643
		3500	1198	3500	715
				3700	785
				3900	875
				4100	915
				4300	995
				4500	1055
				4700	1135

Tabela B.2: Dados da Figura B.2 para o filtro de polipropileno.

POLIPROPILENO					
P=193 kPa		P=393 kPa		P=693 kPa	
Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)
0	0	0	0	0	0
100	14	100	11	100	7
300	30	300	23	300	12
500	94	500	74	500	23
700	179	700	132	700	64
900	269	900	190	900	124
1100	373	1100	210	1100	160
1300	465	1300	281	1300	207
1500	560	1500	335	1500	248
1700	684	1700	399	1700	294
1900	792	1900	566	1900	333
2100	901	2100	673	2100	390
2300	1084	2300	731	2300	460
		2500	837	2500	520
		2700	954	2700	590
		2900	1016	2900	630
		3100	1157	3100	670
				3300	740
				3500	790
				3700	850
				3900	940
				4100	1000
				4300	1050
				4500	1100

Tabela B.3: Dados da Figura B.3 para o filtro de celulose.

CELULOSE					
P=193 kPa		P=393 kPa		P=693 kPa	
Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)
0	0	0	0	0	0
100	63	100	30	100	3
200	213	300	183	300	55
300	317	500	263	500	114
400	406	700	333	700	134
500	493	900	426	900	177
600	564	1100	519	1100	207
700	639	1300	632	1300	238
800	725	1500	765	1500	288
900	831	1700	855	1700	343
1000	870	1900	1002	1900	366
1100	983	2100	1133	2100	437
1200	1111			2300	484
				2500	579
				2700	625
				2900	668
				3100	795
				3300	841
				3500	911
				3700	951
				3820	1073

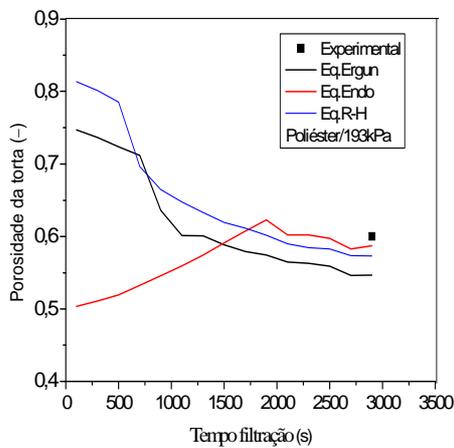
Tabela B.4: Dados da Figura B.4 para o filtro metálico.

METÁLICO					
P=193 kPa		P=393 kPa		P=693 kPa	
Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)	Tempo (s)	ΔP (Pa)
0	0	0	0	0	0
50	125	100	118	100	19
100	292	200	222	200	50
200	367	300	260	300	86
300	456	400	311	400	127
400	572	500	364	500	135
500	694	600	408	600	158
600	809	700	494	700	168
700	934	800	566	800	190
800	1072	900	629	900	235
885	1197	1000	716	1000	245
		1100	794	1100	286
		1200	845	1200	309
		1300	951	1300	357
		1400	1102	1400	386
		1500	1167	1500	416
		1580	1206	1600	481
				1700	520
				1800	558
				1900	593
				2000	646
				2100	702
				2200	821
				2300	842
				2400	891
				2500	971
				2600	1033
				2700	1079
				2800	1137
				2900	1166
				2945	1211

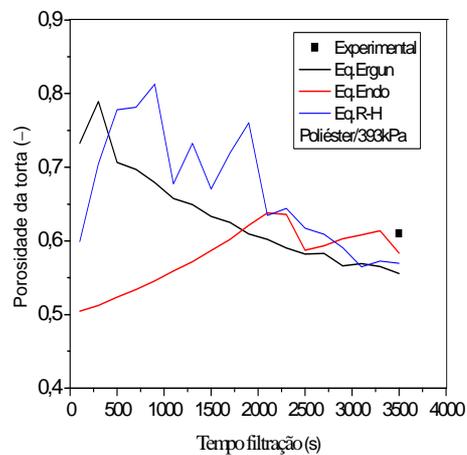
C) POROSIDADE TEÓRICA

A seguir estão apresentados os comportamentos dos ajustes da porosidade teórica em função do tempo de filtração, utilizando as correlações de Ergun (Eq.2.41), de Endo (Eq.2.44) e a de Rudnick-Happel (Eq.2.46), para cada pressão absoluta do sistema. Para essas três correlações o diâmetro de partículas assumido no cálculo da porosidade foi o diâmetro médio geométrico, conforme apresentado na Tabela 3.1, no Capítulo 3.

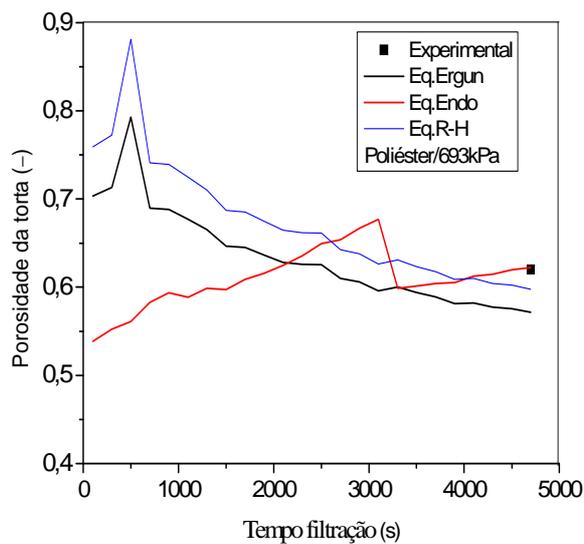
Poliéster



C.1: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de poliéster na P=193 kPa.

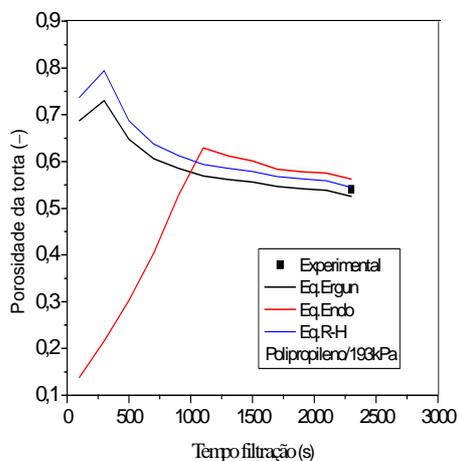


C.2: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de poliéster na P=393 kPa.

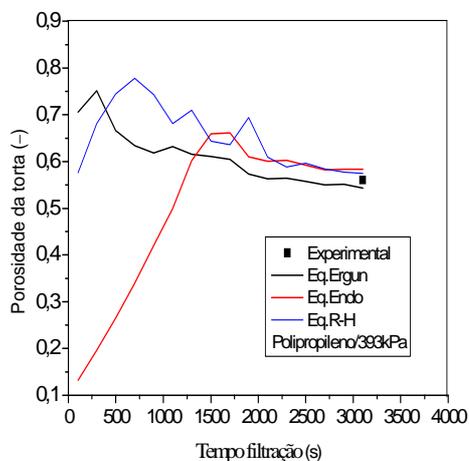


C.3: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de poliéster na P=693 kPa.

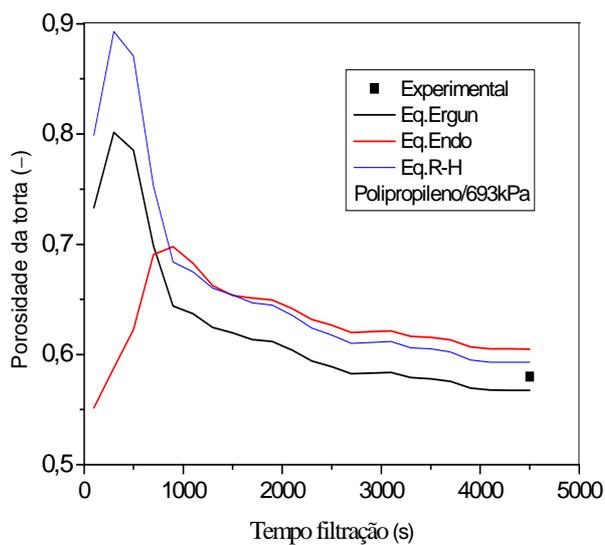
Polipropileno



C.4: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de polipropileno na P=193 kPa.

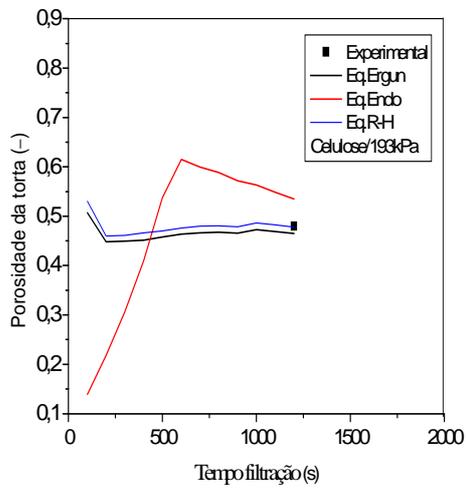


C.5: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de polipropileno na P=393 kPa.

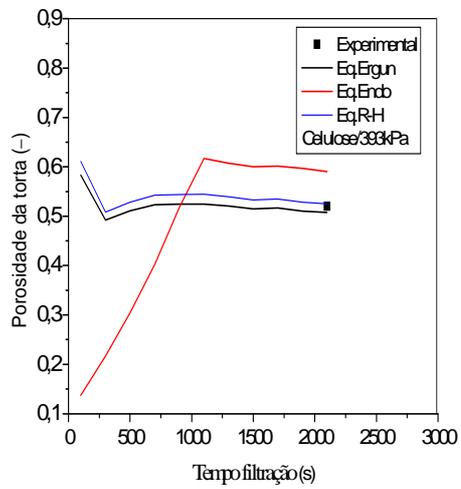


C.6: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de polipropileno na P=693 kPa.

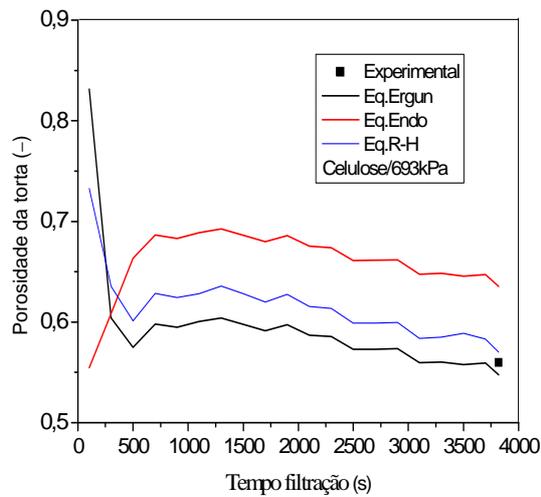
Celulose



C.7: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de celulose na $P=193$ kPa.

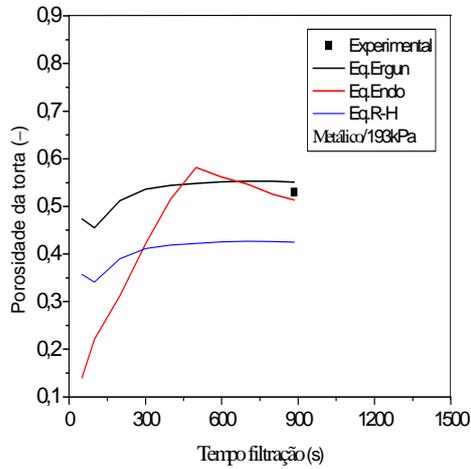


C.8: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de celulose na $P=393$ kPa.

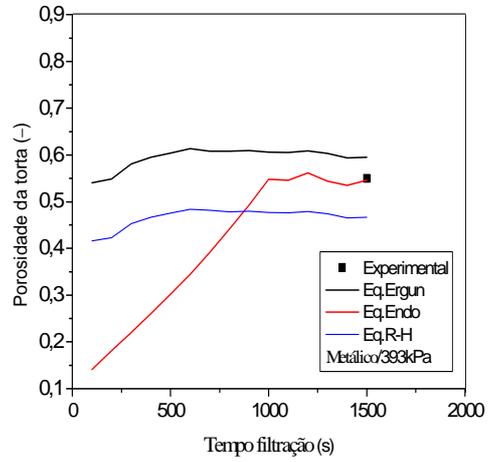


C.9: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de celulose e $P=693$ kPa.

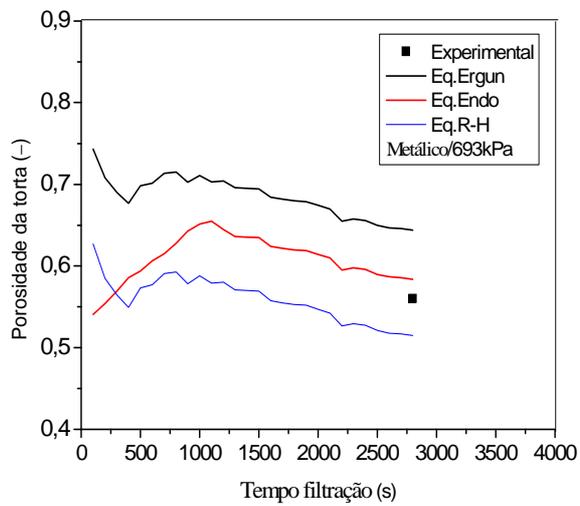
Metálico



C.10: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de metálico na P=193 kPa.



C.11: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de metálico na P=393 kPa.



C.12: Curvas de porosidade em função do tempo no filtro de metálico na P=693 kPa.