

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

**ESTUDO DA FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TORTAS DE
FILTRAÇÃO DE GASES EM FILTROS DE TECIDOS DE
POLIPROPILENO E DE ALGODÃO**

Antonio Carlos Marques Rodrigues

Orientadora: Prof. Dra. Mônica Lopes de Aguiar

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Química, área de concentração Controle Ambiental.

SÃO CARLOS
2004

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

R696ef

Rodrigues, Antonio Carlos Marques.

Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão / Antonio Carlos Marques Rodrigues. -- São Carlos : UFSCar, 2004.

123p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.

1. Filtração. 2. Filtros de manga. 3. Filtros de tecido. I. Título.

CDD: 660.284245(20^a)

DEDICATÓRIA

“De Deus, a realização do homem é neta”

Dante Alighieri, em A Divina Comédia

Dedico este trabalho ao meu filho André para que lhe sirva de estímulo no caminho do saber.

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **ANTONIO CARLOS MARQUES RODRIGUES**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

BANCA EXAMINADORA:

Profª Drª Mônica Lopes de Aguiar
Orientadora, PPG-EQ/ UFSCar

Prof. Dr. José Renato Coury
PPG-EQ/ UFSCar

Prof. Dr. Olímpio Gomes da Silva Neto
SENAI-Mogi Guaçu

AGRADECIMENTOS

“O sentimento mais nobre que uma pessoa pode ter é o da gratidão”

Provérbio Chinês

Agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho especialmente:

à Professora Mônica Lopes de Aguiar pela dedicação, orientação, amizade e ajuda no trabalho,

à Karina Bassan Rodrigues pela amizade e precioso suporte fornecido durante a realização deste trabalho,

ao Engenheiro Djébel Antonio Nogueira que, na qualidade de gerente da Fábrica 3M de Ribeirão Preto, ofereceu-me a oportunidade, incentivou-me, designou-me e disponibilizou recursos para o início da realização deste trabalho,

à 3M do Brasil Ltda. pela designação, confiança e disponibilização de recursos na parte inicial da realização deste trabalho,

à Wânia Christinelli, pela realização de atividades de suporte e operação do Malvern e do Poremaster,

a todos os colegas e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química,

à minha esposa Wânia pela dedicação, compreensão e companheirismo em todos os momentos da realização deste trabalho,

aos meus pais, José (*in memoriam*) e Deolinda, pelo sacrifício, amor e incentivo para que todos os seus filhos tivessem uma formação acadêmica.

SIMBOLOGIA

A	=	Área de filtração [L ²]
a	=	Distância de separação entre duas partículas [L]
B	=	Coeficiente de permeabilidade [L ³ t ² M ⁻¹]
C	=	Fator de correção de Cunningham
d	=	Diâmetro das esferas no modelo de Stokes [L]
d _p	=	Diâmetro de partícula [L]
F	=	Força de adesão entre duas partículas [M L t ⁻²]
F _{VW}	=	Força de Van der Waals entre duas partículas [M L t ⁻²]
F _C	=	Força de remoção da torta [M L t ⁻²]
G	=	Gramatura [M L ⁻²]
H	=	Constante de Hamaker [M L ² t ⁻²]
k	=	Resistência específica total do filtro [M L ⁻² t]
k ₁	=	Resistência específica do tecido [M L ⁻² t ⁻²]
k ₂	=	Resistência específica da torta [t ⁻¹]
k _{2St}	=	Resistência específica da torta pela Lei de Stokes [t ⁻¹]
k _{ck}	=	Constante de Kozeny-Carman para determinação de R
L	=	Espessura do meio filtrante [L]
L _C	=	Espessura da torta [L]
L _F	=	Espessura do tecido [L]
M	=	Massa de torta depositada [M]
MP	=	Ponto de Fusão [T]
N	=	Número de esferas por unidade de área no modelo de Stokes [L ⁻²]
n	=	Número médio de contatos partícula-partícula por unidade de área [L ⁻²]
Q	=	Vazão mássica de partículas [M t ⁻¹]
R	=	Fator de resistência de Rudnick
S	=	Arraste do filtro [M L ⁻² t ⁻¹]
S ₀	=	Arraste inicial do filtro [M L ⁻² t ⁻¹]
S _i	=	Arraste instantâneo do filtro [M L ⁻² t ⁻¹]
S _E	=	Arraste efetivo do filtro [M L ⁻² t ⁻¹]

t	=	Tempo de filtração [t]
T_W	=	Temperatura de trabalho [T]
V_c	=	Velocidade superficial do fluido na limpeza [$L t^{-1}$]
V_f	=	Velocidade superficial do fluido na filtração [$L t^{-1}$]
X	=	Dimensão lateral de um elemento de torta quadrado [L]
W	=	Massa de pó depositada por unidade de área [$M L^{-2}$]
W_i	=	Massa de pó depositada por unidade de área instantânea [$M L^{-2}$]
W_R	=	Massa de pó residual por unidade de área [$M L^{-2}$]
W_{Ri}	=	Massa de pó residual por unidade de área após aplicação de determinada velocidade de limpeza [$M L^{-2}$]

LETRAS GREGAS

α	=	Coefficiente de resistência viscosa do filtro [L^{-2}]
β	=	Coefficiente de resistência inercial do filtro [L^{-1}]
ΔP	=	Queda de pressão total [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_C	=	Queda de pressão de limpeza [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_{C_c}	=	Queda de pressão de limpeza devido à torta [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_F	=	Queda de pressão devido ao tecido [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_i	=	Queda de pressão instantânea [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_{P_c}	=	Queda de pressão parcial para cada velocidade de limpeza [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_{T_c}	=	Queda de pressão total de limpeza [$M L^{-1} t^{-2}$]
ε	=	Porosidade da torta
γ	=	Fração de torta retida após processo de limpeza
γ_P	=	Fração parcial de torta retida após processo de limpeza parcial
μ	=	Viscosidade do fluido [$M L^{-1} t^{-1}$]
ρ_C	=	Densidade da torta [$M L^{-3}$]
ρ_g	=	Densidade do fluido [$M L^{-3}$]
ρ_p	=	Densidade de partícula [$M L^{-3}$]
σ	=	Tensão normal no aglomerado [$M L^{-1} t^{-2}$]
σ_A	=	Tensão para a remoção de elemento de torta normal à superfície [$M L^{-1} t^{-2}$]

- σ_C = Tensão de cisalhamento para a remoção de elemento de torta [$M L^{-1} t^{-2}$]
 σ_r = Tensão de remoção da torta [$M L^{-1} t^{-2}$]
 σ_T = Tensão total requerida para a remoção de um elemento de torta [$M L^{-1} t^{-2}$]

SUBSCRITOS

- 1 = Tecido
2 = Torta
C = Torta
c = Limpeza
F = Tecido
g = Fluido
i = Instantâneo
P = Parcial
p = Partícula
r = Rumpf
T = Total
U = Coesão
W = Trabalho

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
SIMBOLOGIA	ii
SUMÁRIO	v
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Tecidos de Filtração	4
2.1.1 Tecidos Trançados	9
2.1.2 Tecidos Não Trançados	11
2.1.3 Fibras Naturais e Sintéticas	13
2.2 Queda de Pressão no Filtro de Manga	16
2.3 Escoamento Através do Meio Filtrante e da Torta	19
2.4 Avaliação da Resistência Específica da Torta (k_2)	22
2.4.1 Equação de Kozeny – Carman	23
2.4.2 Equação de Rudnick – Happel	24
2.5 Arraste Efetivo do Filtro	25
2.6 Porosidade da Torta	28
2.7 Forças de Adesão	31
2.7.1 Teoria de Rumpf	33
2.8 Remoção da Torta	34

2.8.1	Determinação da Força de Remoção da Torta	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Equipamentos	38
3.1.1	Equipamentos Usados para Filtração e Limpeza	38
3.1.2	Caixa de Filtração	39
3.1.3	Alimentador de Pó	40
3.1.4	Sistema de Controle	42
3.1.5	Outros Equipamentos	42
3.2	Materiais	43
3.2.1	Meios Filtrantes	43
3.2.2	Material Pulverulento	44
3.3	Procedimento Experimental Principal	45
3.3.1	Filtração	45
3.3.2	Remoção da Torta	46
3.4	Cálculos	47
3.4.1	Cálculo e Estimativa da Força de Adesão por Unidade de Área	48
3.4.2	Cálculo do Arraste e da Massa de Pó Depositada	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Caracterização dos Meios Filtrantes	52
4.2	Ciclos de Filtração e Limpeza	55
4.3	Filtração	59
4.4	Remoção	62
4.5	Força de Adesão	66

4.6 Patchy Cleaning	74
4.7 Considerações Finais	78
5 CONCLUSÕES	79
6 SUGESTÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICE A	86
APÊNDICE B	94
APÊNDICE C	107
APÊNDICE D	108
APÊNDICE E	112
APÊNDICE F	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Micrografia da superfície de feltro de polipropileno calandrado a quente, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 100 vezes ..	7
Figura 2.2 – Textura de um tecido trançado de Nylon, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes	9
Figura 2.3 – Tipos de entrelaçamento de tecidos (Fonte: Martins, 2001)	10
Figura 2.4 – Micrografia de um feltro de poliéster não trançado, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes	12
Figura 2.5 – Micrografia de um tecido de algodão trançado mostrando a forma das fibras, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 250 vezes	14
Figura 2.6 – Estrutura da molécula de celulose (Fonte: Billmeyer, 1975)	15
Figura 2.7 – Estrutura da molécula de polipropileno (Fonte: Donovan, 1985) ...	16
Figura 2.8 – Esquema de coleta de partículas no meio filtrante	17
Figura 2.9 – Fator de resistência em função da porosidade do meio para os modelos de Rudnick-Happel e Kozeny-Carman (Fonte: Silva Neto, 2002)	25
Figura 2.10 – Queda de pressão e força de arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área em um filtro de tecido (Fonte: Aguiar, 1991)	27
Figura 2.11 – Tipos de arraste inicial na filtração (Aguiar, 1991)	28
Figura 2.12 – Remoção de um elemento de volume da torta de filtração (Fonte: Leith & Allen, 1986)	35
Figura 2.13 – Fenômeno de “patchy cleaning” durante a limpeza de filtros por fluxo de ar reverso	35
Figura 2.14 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza	37
Figura 3.1 – Esquema geral do equipamento de filtração e limpeza	39
Figura 3.2 – Caixa de filtração	40

Figura 3.3 – Alimentador de pó	41
Figura 3.4 – Variação da % acumulada em volume em função do diâmetro de partícula para o concentrado fosfático de Patos de Minas, obtida no Malvern	44
Figura 3.5 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta	49
Figura 3.6 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta	50
Figura 3.7 – Exemplo de gráfico para estimativa da tensão de remoção	51
Figura 4.1 – Textura da superfície do tecido de algodão, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes.....	52
Figura 4.2 – Textura do feltro de polipropileno, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes	53
Figura 4.3 – Fibras do tecido de algodão, micrografia obtida no MEV do CCDM, com aumento de 2.500 vezes	54
Figura 4.4 – Fibras do tecido de polipropileno, micrografia obtida no MEV do CCDM, com aumento de 2.500 vezes	54
Figura 4.5 – Curvas de filtração seqüenciais dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de polipropileno, para queda de pressão de filtração de 3.920 N/m ² , velocidades de filtração de 6,0 cm/s e de limpeza de 18,0 cm/s	56
Figura 4.6 – Curvas de filtração seqüenciais dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de algodão, para queda de pressão de filtração de 3.920 N/m ² , velocidades de filtração de 6,0 cm/s e de limpeza de 18,0 cm/s	57
Figura 4.7 – Arrastes comparativos para os ciclos de filtração e limpeza iniciais e de saturação dos tecidos de polipropileno e algodão, obtidos com velocidade de filtração de 6,0 cm/s e vazão mássica de pó de 0,02 g/s	58
Figura 4.8 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 4,5 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)	60

Figura 4.9 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 4,5 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)	61
Figura 4.10 – Variação da fração de torta removida em função da velocidade de filtração para o filtro de algodão	65
Figura 4.11 – Variação da fração de torta removida em função da velocidade de filtração para o filtro de polipropileno	66
Figura 4.12 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 7,5 cm/s	67
Figura 4.13 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de tecido de algodão e velocidade de filtração de 7,5 cm/s	68
Figura 4.14 – Tensão de remoção em função da velocidade de filtração para os tecidos de algodão e polipropileno	72
Figura 4.15 – Curvas de tensão de remoção em função da velocidade de filtração para os tecidos de polipropileno e algodão	72
Figura 4.16 – Porosidade média da torta em função da velocidade de filtração para os tecidos de algodão e polipropileno	74
Figura 4.17 – Tamanho das placas de “patchy cleaning”	75
Figura 4.18 – Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da fração de torta removida para o filtro de algodão	76
Figura 4.19 – Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da fração de torta removida para o filtro de polipropileno	76
Figura 4.20 – Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da massa de pó depositada por unidade de área para o filtro de algodão	77
Figura 4.21 – Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da massa de pó depositada por unidade de área para o filtro de polipropileno	77

Figura B.1	– Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 6,0 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)	105
Figura B.2	– Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 6,0 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)	105
Figura B.3	– Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 7,5 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)	105
Figura B.4	– Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 7,5 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)	106
Figura B.5	– Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 9,0 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)	106
Figura B.6	– Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 9,0 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)	106
Figura E.1	– Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s	112
Figura E.2	– Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s	112
Figura E.3	– Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de para algodão e velocidade de filtração de 4,5 cm/s	112
Figura E.4	– Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s	113
Figura E.5	– Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s	113

Figura E.6 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de para algodão e velocidade de filtração de 6,0 cm/s	113
Figura E.7 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s	114
Figura E.8 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s	114
Figura E.9 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de para algodão e velocidade de filtração de 7,5 cm/s	114
Figura E.10 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s	115
Figura E.11 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s	115
Figura E.12 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de algodão e velocidade de filtração de 9,0 cm/s	115
Figura E.13 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s	116
Figura E.14 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s	116
Figura E.15 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 4,5 cm/s	116
Figura E.16 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s	117
Figura E.17 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s	117

Figura E.18 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 6,0 cm/s	117
Figura E.19 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s	118
Figura E.20 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s	118
Figura E.21 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s	118
Figura E.22 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s	119
Figura E.23 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 9,0 cm/s	119
Figura F.1 – Diâmetro médio de partícula removida da torta em função da velocidade de filtração para o tecido de algodão	121
Figura F.2 – Diâmetro médio de partícula removida da torta em função da velocidade de filtração para o tecido de polipropileno	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Arraste inicial (S_0) médio dos tecidos para as diferentes velocidades de filtração utilizadas	62
Tabela 4.2 – Percentuais de torta removida nos filtros de algodão e polipropileno para cada par de queda de pressão e velocidade de filtração	64
Tabela 4.3 – Valores de coeficiente de correlação (R^2), de resistência específica do meio filtrante (k_1), de tensão de remoção (σ_T), de força de adesão (F_c), porosidade (ϵ) e distância entre partículas (a) para o filtro de algodão em cada velocidade de filtração (V_f) e espessura de torta (W)	69
Tabela 4.4 – Valores de coeficiente de correlação (R^2), de resistência específica do meio filtrante (k_1), de tensão de remoção (σ_T), de força de adesão (F_c), porosidade (ϵ) e distância entre partículas (a) para o filtro de polipropileno em cada velocidade de filtração (V_f) e espessura de torta (W)	70
Tabela A.1 – Dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	86
Tabela A.2 – Dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de algodão	87
Tabela A.3 – Outros dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de algodão	88
Tabela A.4 – Outros dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	88
Tabela A.5 – Dados da curva de filtração do 1º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	88
Tabela A.6 – Dados da curva de filtração do 2º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	89
Tabela A.7 – Dados da curva de filtração do 3º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	89
Tabela A.8 – Dados da curva de filtração do 4º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	90

Tabela A.9 – Dados da curva de filtração do 5º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	90
Tabela A.10 – Dados da curva de filtração do 6º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno	91
Tabela A.11 – Dados da curva de filtração do 1º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão	91
Tabela A.12 – Dados da curva de filtração do 2º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão	92
Tabela A.13 – Dados da curva de filtração do 3º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão	92
Tabela A.14 – Dados da curva de filtração do 4º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão	93
Tabela B.1 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 0,640$ kg/m ²	94
Tabela B.2 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 0,980$ kg/m ²	94
Tabela B.3 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 1,220$ kg/m ²	95
Tabela B.4 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,350$ kg/m ²	95
Tabela B.5 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,310$ kg/m ²	96
Tabela B.6 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,650$ kg/m ²	96
Tabela B.7 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,270$ kg/m ²	97
Tabela B.8 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,340$ kg/m ²	97
Tabela B.9 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,580$ kg/m ²	97
Tabela B.10 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,160$ kg/m ²	98

Tabela B.11 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,270$ kg/m ²	98
Tabela B.12 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,310$ kg/m ²	98
Tabela B.13 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 0,630$ kg/m ²	99
Tabela B.14 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 1,350$ kg/m ²	99
Tabela B.15 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 1,480$ kg/m ²	100
Tabela B.16 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,520$ kg/m ²	101
Tabela B.17 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,780$ kg/m ²	101
Tabela B.18 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 1,000$ kg/m ²	102
Tabela B.19 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,330$ kg/m ²	102
Tabela B.20 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,480$ kg/m ²	103
Tabela B.21 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,570$ kg/m ²	103
Tabela B.22 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,260$ kg/m ²	103
Tabela B.23 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,380$ kg/m ²	104
Tabela B.24 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,480$ kg/m ²	104
Tabela C.1 – Dados obtidos nos ensaios preliminares de remoção no tecido de polipropileno	107

Tabela C.2 – Dados obtidos nos ensaios preliminares de remoção no tecido de algodão	107
Tabela D.1 – Dados de limpeza dos filtros de polipropileno para determinação da tensão de remoção das tortas	108
Tabela D.2 – Dados de limpeza dos filtros de algodão para determinação da tensão de remoção das tortas	110
Tabela F.1 – Dados de remoção para o tecido de algodão	122
Tabela F.2 – Dados de remoção para o tecido de polipropileno	122

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar, no processo de formação e de remoção de tortas de filtração de gases em Filtros de Manga, o comportamento de um meio filtrante constituído de tecido entrelaçado, de fibras naturais, com outro constituído de tecido não entrelaçado, de fibras sintéticas.

Os tecidos estudados foram algodão, constituído de fibras naturais, com textura granite e de gramatura 0,735 kg/m² e feltro agulhado de polipropileno, constituído de fibras sintéticas não entrelaçadas e de gramatura 0,600 kg/m².

A célula experimental era constituída por um filtro circular de área livre para filtração de 0,023 m², um alimentador de pó com a vazão mássica e umidade controladas, um microcomputador e um sistema para controle e aquisição de dados. O material pulverulento utilizado foi um concentrado fosfático de densidade 2,79 x 10³ kg/m³ cujo diâmetro médio de partícula era de 4,55 x 10⁻⁶ m.

Na realização deste trabalho, foram efetuadas filtrações do material pulverulento em amostras dos tecidos citados e remoção das tortas formadas pelo processo de fluxo de ar reverso, para obtenção das tensões de remoção das tortas pelo método proposto por Seville et al. (1989) . Foram ainda realizados ciclos sucessivos de filtração e limpeza em ambos os tecidos até a sua saturação, a fim de se avaliar e comparar o comportamento dos tecidos numa situação típica de trabalho, em que o tecido de polipropileno levou mais ciclos para saturar do que o algodão.

Nos procedimentos de filtração foram utilizadas quatro velocidades de gás (4,5 ; 6,0 ; 7,5 e 9,0 cm/s), vazão mássica de pó ajustada para 2,0 x 10⁻⁵ kg/s. (11% da rotação do prato de alimentação) e três quedas finais de pressão de filtração (300; 400 e

500 mmH₂O). Nos procedimentos de remoção por fluxo de ar reverso foram utilizadas seis velocidades de gás (1,6 ; 3,0 ; 9,0 ; 12,0 ; 15,0 e 18,0 cm/s). Nos ciclos sucessivos de filtração e limpeza foi utilizada velocidade de filtração de 6,0 cm/s, queda de pressão final de filtração de 400 mmH₂O e velocidade de limpeza de 18,0 cm/s.

Nos processos de remoção, o tecido de polipropileno apresentou maior grau de limpeza das tortas, em média 77 %, comparado com o algodão que apresentou frações removidas em média de 39%. O tecido de polipropileno também apresentou maior porosidade do que o tecido de algodão.

A tensão de remoção das tortas dos tecidos aumentou com o aumento da velocidade de filtração para ambos os tecidos, sendo que o tecido de polipropileno apresentou tensões de remoção maiores que as apresentadas pelo tecido algodão, notadamente para as tortas obtidas com velocidades de filtração de 6,0 e 7,5 cm/s.

Como constatação secundária, observou-se que o tamanho das placas de torta, removidas nos procedimentos de limpeza dos tecidos, aumentou com o aumento da fração de torta removida para ambos os tecidos estudados.

ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate and to compare, in the processes of cake formation and remotion in the gases filtration with Bag Filters, the behavior of a filter made of natural fibers fabric with other made of synthetic fibers. The fabrics compared were a woven cotton with granite texture of 0.735 kg/m^2 and a non woven polypropylene of 0.600 kg/m^2 .

The experimental apparatus consisted of a circular filter with 0.023 m^2 in area, a powder feeder with controlled powder flow rate and humidity, linked with a microcomputer and a system to collect de data. The particle material was a phosphatic concentrated of density $2.79 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ with mean particle diameter of $4.55 \times 10^{-6} \text{ m}$.

In the realization of this work, they were accomplished filtering procedures of the particle material in samples of the mentioned fabrics and cake remotion procedures with reverse air flow procedure, in order to determine the cake removing tension by the method proposed by Seville et al. (1989), also being evaluated other filtration and remotion aspects and data. In order to compare e evaluated the behavior of the fabrics in job conditions, they were also accomplished successive filtration and cleaning cycles in both fabrics until they become particle material saturated.

During filtration four gas velocities were employed (4.5; 6.0; 7.5 and 9.0 cm/s), the flow rate was adjusted to $2.0 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$ (11% of the feeder total velocity) and three maximum pressure drops across the filter were employed (300 mmH₂O, 400 mmH₂O and 500 mmH₂O). In the cleaning steps six cleaning gas velocities were employed (1.6 cm/s; 3.0 cm/s; 9.0 cm/s; 12.0 cm/s; 15.0 cm/s and 18.0 cm/s). In the successive

filtration and cleaning cycles they were employed gas filtration velocity of 6.0 cm/s, filtration final pressure drop of 400 mmH₂O and gas cleaning velocity of 18.0 cm/s.

The polypropylene fabric has taken more cycles to be saturated with the powder in the filtration and cleaning cycles and presented a greater cleaning degree in the cleaning processes, 77% in average, than the cotton that presented 39% of cake removal in average. The polypropylene fabric porosity was found to be greater than the cotton fabric ones.

The cake-fabric adhesion force per unit of area has increased with the increase of the filtration gas velocity for both clothes, being remarkable that the polypropylene fabric has presented greater values than the cotton fabric, especially for the cakes formed with filtration gas velocities of 6.0 and 7.5 cm/s.

It was also observed that the cake plaques, removed in the cleaning procedures, have increased in size with the increase of the cake removed portion and with the cake mass per unit of area for both studied fabrics.

1 INTRODUÇÃO

Os Filtros de Tecido, também conhecidos como Filtros de Manga, têm sido largamente utilizados no combate à poluição atmosférica causada pela dispersão de materiais particulados no ar e que se origina dos mais diversos processos industriais e de extração, tais como: mineração de carvão natural, cimenteiras, indústrias cerâmicas e indústrias de transformação química. Os principais motivos da larga utilização desse tipo de equipamento são o seu custo relativamente baixo de implantação, sua facilidade de operação e sua alta eficiência na remoção para uma ampla faixa granulométrica de materiais particulados.

Nos últimos tempos, diversos pesquisadores têm-se dedicado ao estudo desse processo de filtração, com o objetivo de torná-lo cada vez mais eficiente e econômico, investigando o processo de formação e limpeza das tortas de filtração, especialmente no sentido de aumentar a vida útil do filtro, de diminuir a frequência de limpeza e de aumentar a sua eficiência; diminuindo assim o seu custo operacional.

A eficiência de limpeza de um filtro é intimamente dependente do processo de formação da torta, do tipo de tecido do filtro e do processo de remoção adotado, que pode ser através de processo de vibração mecânica, de fluxo de ar reverso ou de pulso de ar reverso.

Aguiar (1991) estudou a formação e remoção de tortas filtração de gases em filtros de tecido não trançado de fibras sintéticas (poliéster), utilizando como material particulado o concentrado fosfático de Patos de Minas em três granulometrias distintas; e Lucas (2000) utilizou o mesmo tipo de tecido de filtração, porém comparando os

resultados de três tipos de materiais particulados distintos; concentrado fosfático de Patos de Minas, polvilho doce e silicato de magnésio (talco).

Desta forma, este trabalho se propõe a estudar a formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecido utilizando como material particulado o concentrado fosfático de Patos de Minas e Filtros de Manga em dois tipos diferentes de tecido; algodão trançado, que é uma fibra natural, e polipropileno não trançado, que é uma fibra sintética, com o intuito de determinar e comparar suas características para definir qual deles é mais adequado operacionalmente e economicamente para a filtração e remoção do material pulverulento no processo definido.

Os principais aspectos teóricos envolvidos na formação e remoção da torta em Filtros de Manga e determinação da tensão de remoção da torta pelo método proposto por Seville et al. (1989) são apresentados a seguir.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Dickenson (1994), um filtro é basicamente um dispositivo para separar uma substância de outra, visto que a filtração é basicamente um processo de separação.

Desta forma, o processo de separação pode ocorrer em quatro categorias:

- i) Separação sólido-gás
- ii) Separação sólido-líquido
- iii) Separação líquido-líquido
- iv) Separação sólido-sólido

Nos processos de separação sólido-gás os Filtros de Manga têm sido amplamente utilizados na indústria em geral. Nestes filtros, o fluxo de gás é direcionado para passar através de um tecido que retém os sólidos em sua superfície formando uma torta.

Nos processos de filtração e remoção de tortas em Filtros de Manga vários fatores podem interferir nos mecanismos de coleta e remoção da torta do meio filtrante, tais como: as características do tecido de filtração e do material particulado, a velocidade de filtração, a densidade e viscosidade do gás, a velocidade de limpeza e a espessura da torta; que diretamente influenciam na eficiência e viabilidade econômica deste método de limpeza de gases.

Neste capítulo, são apresentados os principais aspectos teóricos encontrados na literatura a respeito da influência destes fatores, bem como a inter-relação entre eles no equacionamento das principais características e parâmetros do processo.

2.1 Tecidos de Filtração

Sem dúvida alguma as propriedades físicas e estruturais dos tecidos de filtração tem influência marcante no processo de limpeza de gases em Filtros de Manga, visto que neles ocorrem a coleta do material particulado e a remoção deste material durante o processo de limpeza do filtro.

Existem diversas fibras que são utilizadas na confecção dos tecidos usados nos Filtros de Manga. As primeiras fibras utilizadas foram as naturais, principalmente lã e algodão. Embora estas fibras possuam algumas limitações de suas propriedades físicas, elas são ainda empregadas em muitas aplicações de filtração (Donovan, 1985). Entretanto, com o desenvolvimento das fibras sintéticas e a crescente preocupação mundial com a qualidade do ar respirável, a técnica de filtração estendeu, de uma maneira bem mais ampla, a faixa de possíveis aplicações.

Atualmente, as fibras sintéticas são mais utilizadas que as fibras naturais nos filtros de tecido. Isto se deve ao seu baixo custo, maior resistência química e mecânica e menor diâmetro das fibras. As fibras sintéticas mais usadas incluem acetatos, acrílicos, poliamidas, poliésteres, polipropileno entre outros materiais. Para altas temperaturas, usa-se Teflon, Ryton e algumas fibras de carbono que têm sido desenvolvidas para esta aplicação. No entanto, o material sintético mais utilizado nestes casos é a fibra de vidro (Martins, 2001).

A seleção adequada dos tecidos a serem utilizados como meios filtrantes, depende da compatibilidade destes com o material particulado que será coletado e das características e aplicações de cada processo de filtração, que abrangem a temperatura, a abrasão, a energia de absorção, as propriedades da filtração, a resistência a álcalis, a ácidos, a oxigênio e o custo relativo do material (Barnett, 2000).

O desempenho satisfatório de um filtro de tecido em uma aplicação específica requer a seleção tanto do material que será utilizado na filtração, que deve ser compatível com o material particulado que será coletado, quanto de um projeto apropriado para a geometria do coletor de pó e dos requisitos de limpeza. Deve-se ressaltar que tanto as fibras e fios como todos os parâmetros do tecido influenciam no processo de filtração (Martins, 2001).

A resistência do tecido, a estabilidade e a flexibilidade são parâmetros importantes na determinação da capacidade do tecido em resistir ao desgaste causado pela abrasão. O termo “abrasão” é definido como a erosão das fibras do tecido ou do material da superfície da fibra, resultante do contato entre a fibra e as partículas de pó ou entre as fibras adjacentes. Outra característica importante, que deve ser levada em consideração no critério de seleção do tecido, é a capacidade do tecido em liberar, durante o processo de limpeza, o pó coletado durante a filtração. Esta capacidade depende do modo e intensidade da limpeza, mas também do caráter adesivo do tecido. A flexibilidade do tecido de filtração pode facilitar a limpeza, melhorando a remoção de pó depositado, mas esta propriedade pode facilitar a degradação do tecido, reduzindo o tempo de vida útil do mesmo. Portanto, deve-se ter cuidado na escolha da flexibilidade do tecido, pois esta pode ser necessária ou prejudicial ao processo (Martins, 2001). Koch et al. (1996) demonstraram que o aumento da flexibilidade do tecido diminuiu consideravelmente a tensão de remoção da torta.

A maneira pela qual o tecido é confeccionado é uma das características que determinam a deposição e a liberação do pó no seu meio. No entanto, não se tem um conhecimento detalhado sobre isto. Sabe-se apenas que uma superfície de tecido lisa libera o pó com mais facilidade do que uma superfície felpuda. Isto porque o pó pode

ficar retido nas fibras de uma superfície felpuda e dificultar a limpeza diminuindo sua eficiência (Martins, 2001).

Uma boa melhora na liberação da torta de pó do tecido tem sido atingida através de modificações na superfície do tecido. Uma das maneiras de se conseguir uma maior eficiência de limpeza é um tratamento chamado de chamuscamento. Este tratamento utiliza uma chama para remover as fibras salientes da superfície do tecido (Donovan, 1985).

Alguns acabamentos dos tecidos para filtros geralmente fornecem uma melhor estabilidade durante o uso, regulam a permeabilidade do tecido e modificam as características de sua superfície. A regulagem da permeabilidade pode ser realizada por vários tratamentos, sendo o mais significativo realizado através do calor e pressão da operação de calandragem que, segundo Donovan (1985), consiste em se fazer passar o tecido entre ou sobre rolos uma ou mais vezes, efetuando uma ação de compressão do tecido a quente ou a frio. A Figura 2.1 mostra os efeitos do chamuscamento e calandragem em feltro de polipropileno, em que nota-se a presença de pontos de fibras fundidas na superfície.

Um tratamento eficiente para melhorar o destacamento da torta de pó da superfície do meio filtrante é o aquecimento do tecido até que ocorra o derretimento e a fusão das fibras. Contudo, este tratamento também aumenta a resistência ao escoamento no tecido. Este aquecimento é realizado a uma temperatura correspondente à máxima admitida pelo tecido em condições de operação (Martins, 2001).

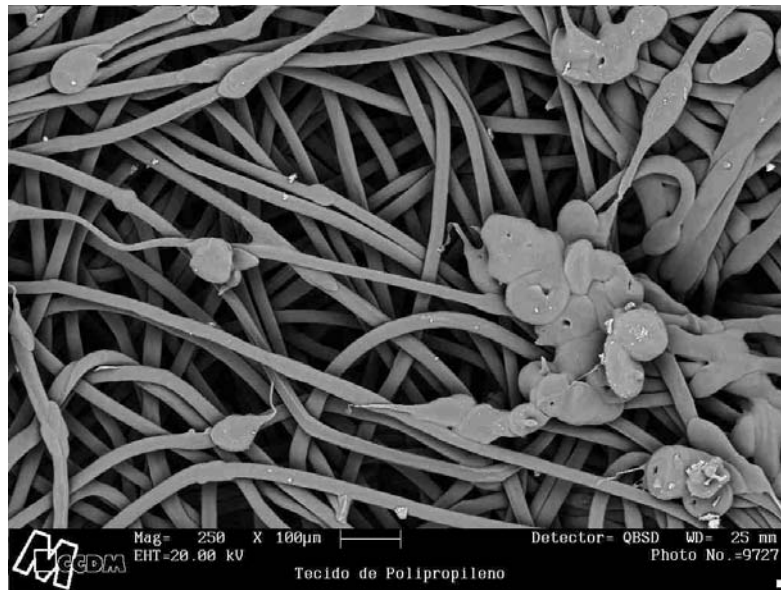


Figura 2.1 – Micrografia da superfície de feltro de polipropileno chamuscado e calandrado, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 100 vezes.

Existem outros acabamentos que são especialmente desenvolvidos para modificar a superfície do tecido no sentido de aumentar o desprendimento da torta, como também, modificar a porosidade do tecido e melhorar a eficiência do filtro (Martins, 2001). Estes acabamentos incluem a vitrificação, que é uma calandragem à quente bem controlada para fundir as fibras e proporcionar uma aparência vítrea ao tecido, e aplicação de cobrimentos de produtos químicos através de banhos, dispersão ou mergulhos, e ainda a laminação de membranas sobre a superfície do tecido (Donovan , 1985).

A superfície do tecido também pode ser modificada pela cobertura das fibras com um composto microporoso, que pode ser uma membrana ou um complexo químico poroso (Lydon, 2000).

Segundo Martins (2001), os tratamentos realizados nos tecidos alteram tanto sua permeabilidade quando limpos quanto a sua permeabilidade após terem sido usados,

isto é, quando existe uma quantidade de material particulado depositado nas fibras do tecido (material particulado residual).

A liberação do pó também depende da resistência elétrica das fibras escolhidas. Esta resistência depende da umidade, que tem um efeito marcante na operação de filtração com tecidos (Martins, 2001).

Segundo Koch et al. (1996), o destacamento da torta é mais fácil em tecidos chamuscados, visto que eles são livres de fibras protuberantes, e em tecidos com acabamentos de energia superficial uniformemente baixas, tais como politetrafluoretileno (PTFE) e algumas membranas cerâmicas finas.

Para a remoção de tortas de filtração dos tecidos, existem três principais processos para limpeza dos tecidos nos Filtros de Manga:

a) Por vibração mecânica, em que um motor promove a vibração mecânica do tecido ocasionando sua limpeza.

b) Fluxo de ar reverso, que consiste em se fazer escoar ar limpo no tecido no sentido inverso ao da filtração para remover o material depositado, sendo para isso necessário interromper a filtração.

c) Pulso de ar reverso, em que um jato de ar limpo é aplicado ao tecido no sentido inverso ao da filtração. Este processo ocorre em fração de segundos, não sendo necessário interromper a filtração, mas gera maior desgaste no tecido (Matteson, 1986).

O tipo do tecido tem grande influência no processo de remoção das tortas de filtração; nos itens a seguir são apresentados os principais detalhes dos tipos de tecidos e fibras mais utilizadas no processo de filtração de gases em filtros de tecido.

2.1.1 Tecidos Trançados

Muitos tecidos utilizados na filtração de gases são confeccionados, completamente ou parcialmente, por trançamento. Tecidos de feltro, ou chamados não trançados ou ainda não tecidos, incluem uma base de tecido trançado.

Tais tecidos são produzidos por entrelaçamento das fibras que os compõem. Durante o entrelaçamento, fios longitudinais são entrelaçados em ângulo reto com fios transversos por meio de um tear. A Figura 2.2 apresenta a textura de um tecido trançado de Nylon, mostrando o entrelaçamento entre os fios longitudinais e transversais do tecido.

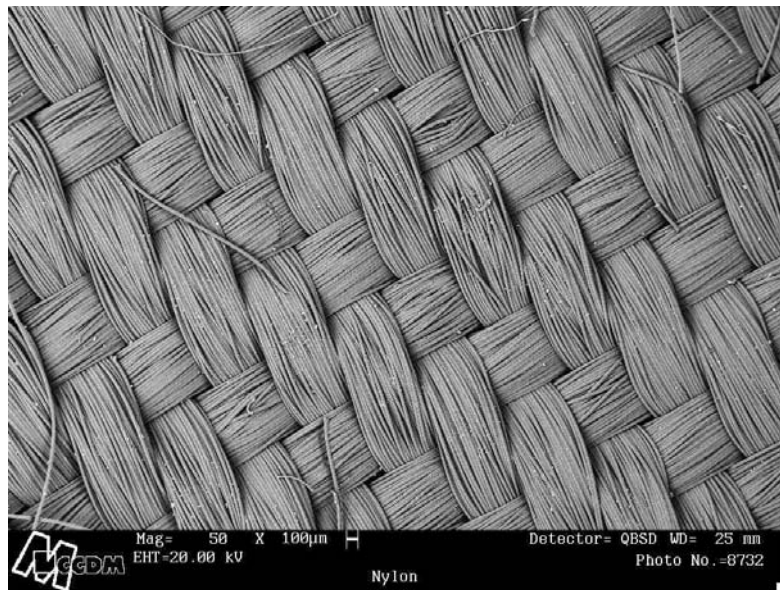


Figura 2.2 – Textura de um tecido trançado de Nylon, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes.

Embora existam muitos modelos de entrelaçamento os tecidos mais comumente usados em filtração gasosa, ainda segundo Davis (1992), são sarja, cetim ou tramas lisas. A Figura 2.3 mostra alguns tipos de tramas de tecidos trançados.

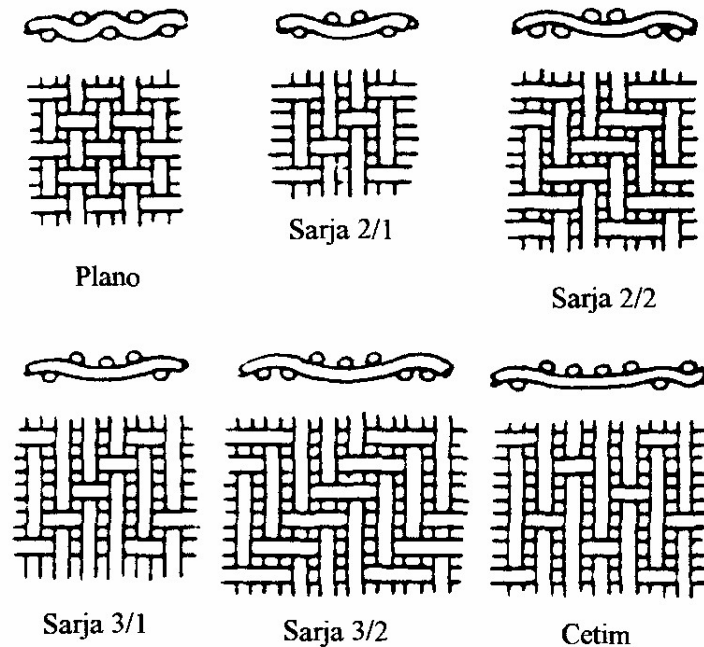


Figura 2.3 – Tipos de entrelaçamento de tecidos (Fonte: Martins, 2001)

Os Filtros de Manga, nos quais o fluxo de gás ocorre do interior dos sacos para fora, como os limpos por ar reverso ou vibração mecânica, operam geralmente com baixas vazões de gás, usam quase que exclusivamente os tecidos trançados. Estes tecidos tem grande restrição a fluxos altos, mas grande resistência mecânica se comparados a tecidos não trançados. Devido a isto, eles são selecionados nas aplicações de limpeza por fluxo de ar reverso e por vibração mecânica. No entanto, segundo Davis (1992), nas aplicações com limpeza por pulso de ar reverso o uso de tecidos trançados é usualmente restrito devido à diminuição da eficiência de filtração que este procedimento de limpeza acarreta ao tecido, por ser realizado em pulsos de alto fluxo de gás (jatos).

2.1.2 Tecidos Não Trançados

Os tecidos não trançados são, geralmente, definidos como lâminas ou estruturas de tela feitas por vinculação ou entrosamento de fibras, fios ou filamentos por meios mecânicos, térmicos, químicos ou por solvente (Martins, 2001). Uma tradicional associação internacional de empresas fabricantes de tecidos não trançados, com sede na Carolina do Norte nos Estados Unidos, a INDA (Association of Nonwoven Fabrics Industry), fornece a seguinte definição:

“Um tecido não trançado é feito diretamente a partir de uma trama de fibras sem a preparação do fio requerida por entrelaçamento. As fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso. A integridade estrutural desta trama é dada por: 1) ancoramento mecânico das fibras, 2) união induzida térmica ou quimicamente, ou 3) aplicação de alguns adesivos ou resinas”

A Figura 2.4 mostra a superfície de um tecido não trançado de poliéster, que é uma fibra sintética, onde se observa o empacotamento desordenado das fibras para formação do tecido.

Um processo usado para produzir tecidos não trançados é a perfuração com agulhas, onde uma teia fibrosa já formada é introduzida em uma máquina equipada com grupos de agulhas apropriadas para reordenar as fibras, criando desta forma a ligação mecânica entre as fibras individuais. Este processo é geralmente usado para produzir tecidos com alta densidade e também para combinar duas ou mais camadas de fibras em um feltro. Algumas modificações na estrutura básica produzida no processo de perfuração podem determinar a “performance” de filtração dos tecidos agulhados. Quando a densidade de perfuração é aumentada durante o processo, um dos resultados é

um aumento na densidade do tecido, que promove um aumento na eficiência de filtração (Martins, 2001).

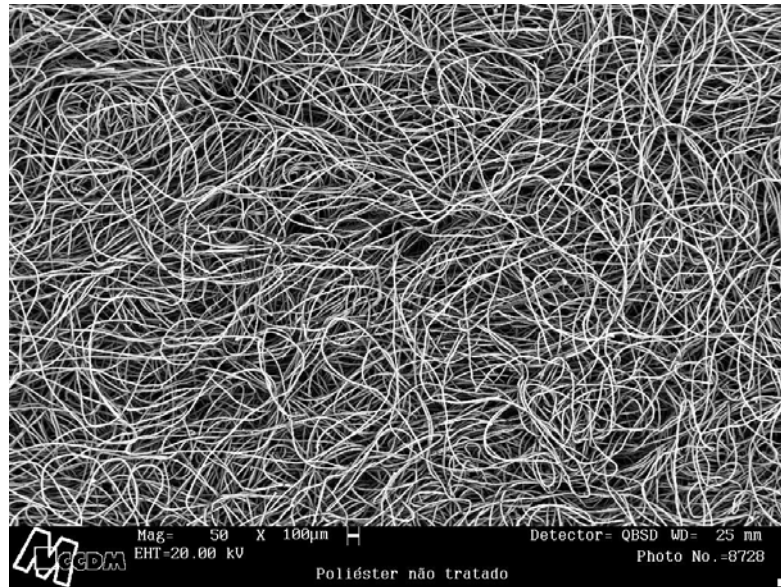


Figura 2.4 – Micrografia de um feltro de poliéster não trançado, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes

A combinação de camadas em um único feltro também pode ser conseguida pela adição de ligantes mas, segundo Baker (2001), um dos problemas na criação de meios compostos ligando várias camadas é fazer a ligação sem que isto interfira no processo de filtração. Alguns ligantes podem não resistir a solventes e produtos químicos, enquanto outros reduzem a área de filtração do meio. Por isso existem estudos sobre o desenvolvimento de meios que não requerem a adição de ligantes.

Sanchez et al.(1997) estudaram os tecidos trançados e os não trançados (feltros) segundo alguns parâmetros que envolviam a massa de pó coletada, a queda de pressão do filtro, a área de filtração, o tempo de filtração e a velocidade de filtração, para quatro

diferentes tipos de tecidos trançados e dois não trançados. O estudo mostrou que para os tecidos trançados, com características similares, a queda de pressão no tecido foi maior para os tecidos confeccionados com fios mais finos. Desta forma, a operação de filtração, neste caso, foi pior do que para os tecidos confeccionados com fios mais grossos, que apresentaram uma queda de pressão no tecido menor. Constatou-se também, que os feltros tiveram uma melhor “performance” depois de três horas de filtração.

2.1.3 Fibras Naturais e Sintéticas

Uma fibra pode ser definida como uma partícula de comprimento no mínimo três vezes maior do que sua largura (Dickenson, 1994). As fibras de que os tecidos dos filtros são feitos se originam tanto da natureza quanto de processos de manufatura.

As fibras de ocorrência natural podem ser de origem animal, vegetal ou mineral e até o início do século passado constituíam-se na única fonte disponível de fibras têxteis. Filtros de alta qualidade foram desenvolvidos a partir de fibras de algodão e lã, mas estes tecidos encontram limitações de aplicação nos processos de filtração atuais de fontes de combustão, principalmente devido a limitações de temperatura. Apenas a partir de meados do século passado, com o desenvolvimento das fibras sintéticas, ocorreu a fabricação de tecidos de alta qualidade, como a lã de vidro, capazes de operar em altas temperaturas (Donovan, 1985).

Entre as principais fontes de fibras naturais utilizadas na fabricação de tecidos pode-se citar as celulósicas como o algodão, o linho, o rami, a juta e o coco; as protéicas como a lãs de ovelha, alpaca, lhama e vicunha; as de secreção animal como as sedas; as borrachas naturais e as fibras minerais como o asbestos (Donovan, 1985).

Segundo Billmeyer (1975), a fibra de algodão, que é de particular interesse neste trabalho, é composta de 95 % de celulose, com pequenas quantidades de proteína, pectina e cera, e podem ser facilmente reconhecidas ao microscópio por sua forma achatada e retorcida, o que é ilustrado na Figura 2.5. A celulose é um polissacarídeo formado por radicais de β -D(+)-glucose unidos em cadeia formando uma estrutura descrita na Figura 2.6.

As fibras de algodão resistem bem a lavagens repetidas, ao contrário da maioria das fibras animais e sintéticas, que perdem resistência ao molhar-se ou umedecer-se, também suportando mais o calor do que as outras fibras naturais (Billmeyer, 1975).

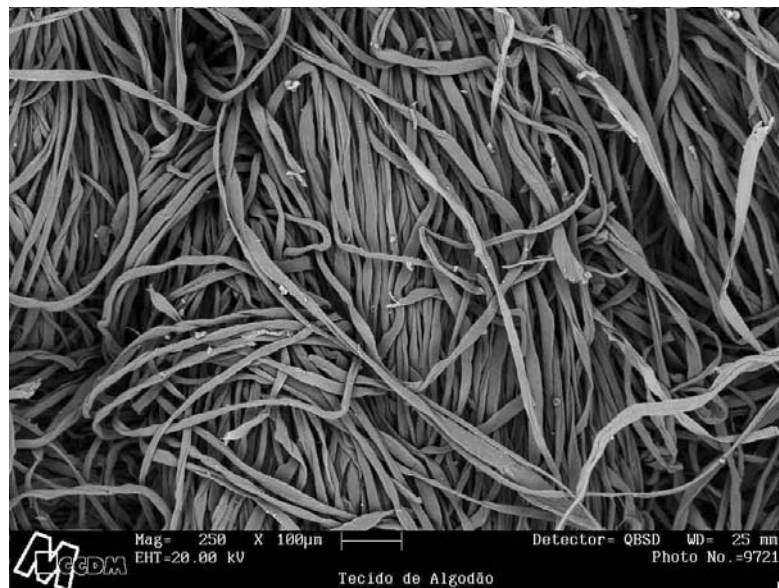


Figura 2.5 – Micrografia de um tecido de algodão trançado mostrando a forma das fibras, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 250 vezes

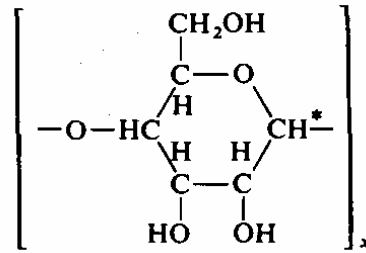


Figura 2.6 – Estrutura da molécula de celulose (Fonte: Billmeyer, 1975)

Observa-se na Figura 2.6 que, na unidade repetitiva da molécula de celulose, existem três grupos hidroxila (OH), havendo portanto a possibilidade de formação de muitas pontes de hidrogênio nesta molécula (Billmeyer, 1975).

As fibras naturais podem ser trabalhadas e convertidas em fibras artificiais através de transformação química. Assim, se a celulose for dissolvida em produtos químicos adequados e se precipitar como celulose pura, o produto resultante é conhecido como celulose regenerada ou genericamente como Rayon, neste processo não mais do que 15 % dos hidrogênios dos grupos hidroxila são substituídos, sendo portanto o Rayon similar ao algodão, porém com propriedades físicas controladas, adequadas para usos específicos. Outras fibras obtidas a partir da celulose são o acetato e o triacetato de celulose (Donovan, 1985).

Fibras sintéticas são aquelas produzidas a partir de soluções químicas que não são derivadas de fibras naturais e que são processadas para formar polímeros de cadeias longas, que têm pequenas moléculas de uma unidade repetitiva unidas. No século 20 o advento das fibras sintéticas gerou um dramático avanço na tecnologia têxtil, que era anteriormente dependente das fontes de fibras naturais (Donovan, 1985).

Entre as principais fibras sintéticas utilizadas na fabricação de tecidos podemos citar as fibras de Nylon, polietileno, polipropileno, poliéster e acrílico (Donovan, 1985).

As fibras de polipropileno, que também são de particular interesse neste trabalho, são obtidas do propileno ($\text{CH}_3\text{CH}=\text{CH}_2$) e são compostas de um polímero de cadeias longas com unidades repetitivas, conforme apresentado na Figura 2.7. O polipropileno possui propriedades químicas inertes, não sendo afetado pela maioria dos ácidos e álcalis, e grande resistência à umidade (Billmeyer, 1975).

Observa-se na Figura 2.7 que o polipropileno apresenta apenas átomos de carbono e hidrogênio em sua estrutura, sem a presença de hidroxilas como no algodão (Figura 2.6).

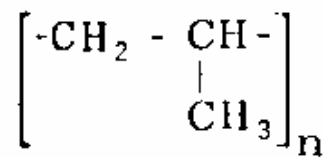


Figura 2.7 –Estrutura da molécula de polipropileno (Fonte: Donovan, 1985)

Nos itens a seguir, são apresentados os principais aspectos físicos relacionados à filtração e remoção de tortas em meios porosos, como o Filtro de Manga.

2.2 Queda de Pressão no Filtro de Manga

O processo de filtração em Filtros de Manga consiste na passagem de uma suspensão de partículas em um gás (aerossol) através de um meio filtrante poroso que retém as partículas em suspensão. À medida que a suspensão escoar através do meio filtrante, as partículas são retidas na sua superfície formando uma torta de pó que dificulta a passagem do fluxo pelo filtro e, conseqüentemente, aumentando a queda de

pressão através dele (Silva Neto, 2002). A Figura 2.8 ilustra a formação da torta nos processos de filtração em filtros de manga.

A queda de pressão total de um filtro de manga (ΔP) é a diferença entre a pressão de entrada do fluido no filtro e a pressão de saída, após sua passagem pelo meio filtrante, que deve ser um meio poroso para permitir a passagem do gás. Segundo Cavasseno (1980), a maioria dos filtros coletores de pó na prática são operados com quedas de pressão entre 5 e 20 cm de coluna de água, porque essa mostrou ser a melhor faixa de operação do ponto de vista econômico, visto que quedas de pressão mais altas requerem equipamentos mais potentes e caros, com alto consumo de energia.

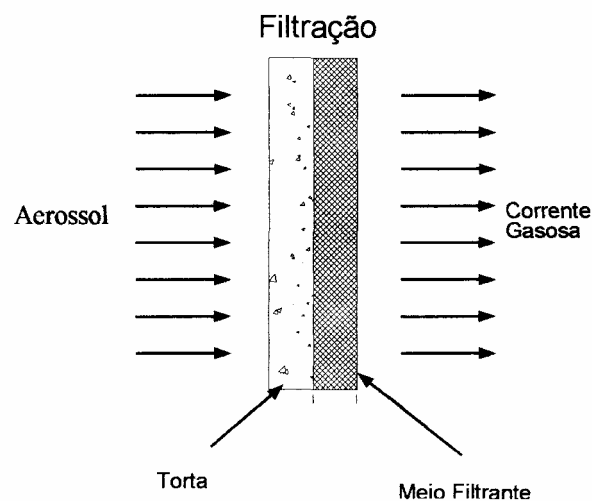


Figura 2.8 – Esquema de coleta de partículas no meio filtrante

De acordo com Perry & Green (1984), o escoamento de um gás através de meios porosos consolidados é semelhante ao escoamento através de leitos sólidos granulares. Conseqüentemente, o comportamento geral da queda de pressão em função da velocidade superficial de escoamento do gás é semelhante em forma à função correspondente para os leitos sólidos granulares, isto é, a transição do escoamento

laminar para turbulento é gradual (Aguilar, 1991), sendo definida para um fluido incompressível conforme a expressão:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \mu V_f + \beta \rho_g V_f^2 \quad (1)$$

onde L é a espessura do meio filtrante, α é o coeficiente de resistência viscosa, μ a viscosidade do gás, V_f a velocidade superficial de escoamento do gás, β o coeficiente de resistência inercial do filtro e ρ_g a densidade do gás. O primeiro termo da equação corresponde ao componente viscoso e o segundo ao inercial.

Os processos de filtração de gases através de meios porosos usualmente se dão em baixas velocidades (Matesson, 1986) e, neste casos, o escoamento turbulento não é favorecido porque as fibras do meio poroso evitam a formação de vórtices maiores, deixando o fluxo dominado pela viscosidade, que pode ser considerado puramente viscoso (fluido de Stokes), pode-se assim desprezar o termo inercial da equação, que conseqüentemente se reduz a:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \mu V_f \quad (2)$$

que é denominada equação ou lei de Darcy para escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis através de meios porosos e pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V_f}{B} \quad (3)$$

onde $B = 1 / \alpha\mu$ é o coeficiente de permeabilidade do meio filtrante e pode ser considerado constante para meios e fluidos incompressíveis e fluidos newtonianos (Lucas, 2000). Pode-se ainda reescrever a equação (3) da seguinte forma:

$$\Delta P = k V_f \quad (4)$$

onde $k = L/B$ é denominado resistência específica total do filtro e fornece uma relação linear entre a queda de pressão e a velocidade de filtração, sendo k o coeficiente angular da curva. A resistência específica do filtro depende do material e da porosidade do filtro, que por sua vez depende de alguns parâmetros como velocidade de filtração, umidade e propriedades do pó (Silva Neto, 2002).

2.3 Escoamento Através do Meio Filtrante e da Torta

O meio filtrante propriamente dito é o tecido que constitui o filtro e tem a sua espessura (L_F) constante, desta forma pode-se analogamente à equação (4) definir a queda de pressão em decorrência da passagem do fluxo de gás através do tecido conforme a equação abaixo:

$$\Delta P_F = k_l V_f \quad (5)$$

onde $k_1 = L_F / B$ é a resistência específica do tecido e pode ser considerada constante já que a espessura do tecido (L_F) e o coeficiente de permeabilidade do tecido (B), em princípio, não variam no processo de filtração (Lucas, 2000).

Entretanto, a espessura da torta (L_C) varia com o tempo de filtração, visto que no decorrer do processo o material coletado vai se acumulando em sua superfície, sendo difícil a sua mensuração. Entretanto, se a torta for considerada incompressível, i.e., com permeabilidade e porosidade constantes, e se a densidade da partícula de pó (ρ_p) e a porosidade da torta (ε) forem conhecidas (Aguilar, 1991), ela pode ser calculada pela massa de pó depositada por unidade de área (W), através da equação:

$$W = \rho_p (1 - \varepsilon) L_C \quad (6)$$

Para se definir então a espessura da torta em função da porosidade, da densidade de partícula e da massa de pó depositada por unidade de área, basta que se rearranje essa equação, isolando-se a espessura da torta (L_C) para se chegar à expressão:

$$L_C = \frac{W}{\rho_p (1 - \varepsilon)} \quad (7)$$

Pode-se definir a queda de pressão devido ao escoamento do gás através da torta (ΔP_C) substituindo-se essa equação na equação (3), para se chegar agora à expressão:

$$\Delta P_C = k_2 V_f W \quad (8)$$

onde $k_2 = 1/[\rho_p (1-\varepsilon)B]$ é a resistência específica da torta e é constante para um dado meio, pó e porosidade (Leith & Allen, 1986). Mantida a velocidade de filtração constante, essa equação estabelece uma relação linear entre a queda de pressão através da torta (ΔP_C) e a massa de pó depositada por unidade de área (W). Entretanto, a massa de pó depositada por unidade de área (W) é dada conforme a equação (9):

$$W = \frac{M}{A} \quad (9)$$

onde M é a massa de pó depositada e A é a área de filtração. Levando-se essa definição na equação (8), a queda de pressão na torta resulta em :

$$\Delta P_C = \frac{k_2 V_f M}{A} \quad (10)$$

Entretanto, pode-se expressar a massa depositada de outra forma substituindo-se a equação (9) na equação (6), chegando-se à seguinte definição:

$$M = L_C A \rho_p (1-\varepsilon) \quad (11)$$

assim, levando-se essa equação na equação (10), a queda de pressão na torta pode ainda ser escrita como:

$$\Delta P_C = k_2 V_f L \rho_p (1-\varepsilon) \quad (12)$$

A equação (12) relaciona a queda de pressão na torta com a sua espessura (L_C) e sua porosidade (ε).

2.4 Avaliação da Resistência Específica da Torta (k_2)

A resistência específica da torta (k_2) pode ser determinada a partir de equações ou ser diretamente medida. Para um meio composto de esferas isoladas, a lei de Stokes descreve a queda de pressão da seguinte forma:

$$\Delta P = \frac{3 \pi \mu V_f d N}{C} \quad (13)$$

onde N é o número de esferas por unidade de área, d é o diâmetro das esferas e C o fator de correção de Cunningham, proposto a partir da teoria cinética do gases e que corrige a Lei de Stokes quando as partículas são muito pequenas (menores que $5 \mu\text{m}$). Deve-se esclarecer entretanto que a relação estabelecida por Stokes é realista somente se a porosidade (ε) se aproxima da unidade. Levando-se a equação (13) na equação (8) e fazendo-se $W = N \rho_p \pi d^3 / 6$ chega-se a:

$$k_{2St} = \frac{18 \mu}{\rho_p d^2 C} \quad (14)$$

A equação (14) define a queda de pressão através de uma montagem de esferas uniformemente distribuídas no espaço e distanciadas o suficiente para que não haja interação entre elas, definindo também o limite inferior da queda de pressão através de

um meio poroso. Em um meio real, as partículas se tocam e o fluxo em torno de uma afeta o fluxo em torno das partículas próximas; essa interação leva ao fato de que a queda de pressão real é maior do que a predita pela Lei de Stokes, aumentando quanto maior for a compactação e menor for a porosidade do meio.

Para demonstrar o efeito da porosidade Rudnick (1978) definiu o fator de resistência R , que multiplicado por k_{2St} fornece um valor de k_2 real, isto é:

$$k_2 = R k_{2St} \quad (15)$$

desta forma, R é sempre maior do que a unidade, sendo um valor grande quando a porosidade é baixa e próxima da unidade quando a porosidade também se aproxima dela.

2.4.1 Equação de Kozeny - Carman

Carman (1956) estabeleceu uma relação que é freqüentemente usada para descrever a queda de pressão através de um depósito de pó. Nela assume-se que o fluxo ocorre através de capilares cuja superfície se iguala a das partículas que compõem o meio e o volume dos capilares se iguala ao volume de vazios do meio, tendo sido estabelecida como:

$$R = \frac{2 k_{ck} (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (16)$$

sendo k_{CK} uma constante empírica de valor igual a 4,8 para esferas e 5,0 para formas irregulares. Nesta equação, quando a porosidade se aproxima da unidade o valor de R se aproxima de zero e, portanto, se a porosidade é alta o valor de R é baixo e conseqüentemente também o da queda de pressão prevista.

Billings & Wilder (1970) alertaram que a equação de Kozeny-Carman não pode ser usada se a porosidade for maior que 0,7 e Carman (1956) afirmou que a equação não pode ser usada se a porosidade for maior que 0,8.

2.4.2 Equação de Rudnick-Happel

Rudnick (1978) utilizou o modelo de célula de superfície livre de Happel para determinar o fator de resistência R. Nesse modelo, assume-se que cada partícula seja uma esfera posicionada no centro da célula. O volume da célula é tal que a porosidade de cada célula se iguala à porosidade do meio. A tensão tangencial no fluido nos pontos onde as células se juntam é considerada zero. Essas considerações permitem uma solução exata para a equação de Navier-Stokes, que descreve o movimento de fluidos com viscosidade e densidades constantes, assumindo-se que o termo inercial seja desprezível. Assim, o fator de resistência se torna:

$$R = \frac{3 + 2(1 - \varepsilon)^{5/3}}{3 - 4,5(1 - \varepsilon)^{1/3} + 4,5(1 - \varepsilon)^{5/3} - 3(1 - \varepsilon)^2} \quad (17)$$

Por ser obtida em bases teóricas, a equação (17) não contém nenhuma constante empírica.

A Figura 2.9, mostra uma relação entre os valores dos fatores de resistência (R) calculados pelos modelos de Rudnick-Happel e Kozeny-Carman em função da porosidade do meio (ϵ).

Observa-se na Figura 2.9 que as equações apresentadas são concordantes para valores de porosidade abaixo de 0,6. Entretanto, para valores de porosidade maiores as equações divergem, sendo que a equação de Rudnick-Happel prediz que R aproxima-se do limite de Stokes, enquanto que a equação de Kozeny-Carman prediz que R se aproxima do zero, sendo a primeira portanto a melhor estimativa teórica de R para altas porosidades.

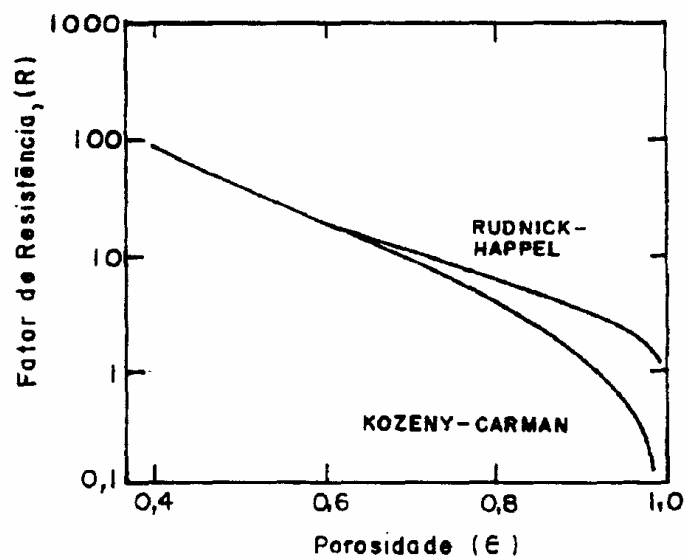


Figura 2.9 - Fator de resistência em função da porosidade do meio para os modelos de Rudnick-Happel e Kozeny-Carman (Fonte: Silva Neto, 2002)

2.5 Arraste Efetivo do Filtro

Considerando-se que a queda de pressão total no filtro (ΔP) é a diferença entre a pressão de entrada e de saída do filtro, sendo decorrente do somatório das quedas de pressão no tecido (ΔP_F) e na torta (ΔP_C), pode-se somar as equações (5) e (8) para que resulte em:

$$\Delta P = k_1 V_f + k_2 V_f W \quad (18)$$

dividindo-se os dois lados da equação por V_f , chega-se a:

$$\frac{\Delta P}{V_f} = k_1 + k_2 W \quad (19)$$

definindo-se agora o arraste do filtro (S) como sendo a razão da queda de pressão (ΔP) pela velocidade superficial de filtração (V_f), tem-se:

$$S = k_1 + k_2 W \quad (20)$$

A equação (20) mostra que, no caso de tortas incompressíveis, o arraste (S) varia linearmente com a massa de pó depositada por unidade de área (W); entretanto a equação só é válida depois da formação da torta, na região considerada de deposição homogênea de pó na torta (Lucas, 2000). A Figura 2.10 apresenta o modelo ideal de variação do arraste do filtro (S) e da queda de pressão (ΔP) em função da massa de pó depositada por unidade de área (W).

A Figura 2.10 mostra que o arraste no início da filtração, ou seja, antes da formação da torta, apresenta um comportamento não linear com relação à massa de pó

depositada por unidade de área. Após a formação da torta na superfície do meio filtrante (região de deposição homogênea), o arraste aumenta linearmente com a massa de pó depositada. Como mostra essa figura, se se prolongar a curva da região linear até o ponto correspondente à massa de pó residual por unidade de área (W_R) obtém-se o valor do arraste efetivo do filtro (S_E). Observa-se ainda nessa figura que a deposição da torta após a saturação do tecido tem duas fases distintas; a região de formação da torta e a região de deposição homogênea da torta em que a equação (20) é válida. Assim, o arraste efetivo pode ser dado por:

$$S = S_E + k_2 (W - W_R) \quad (21)$$

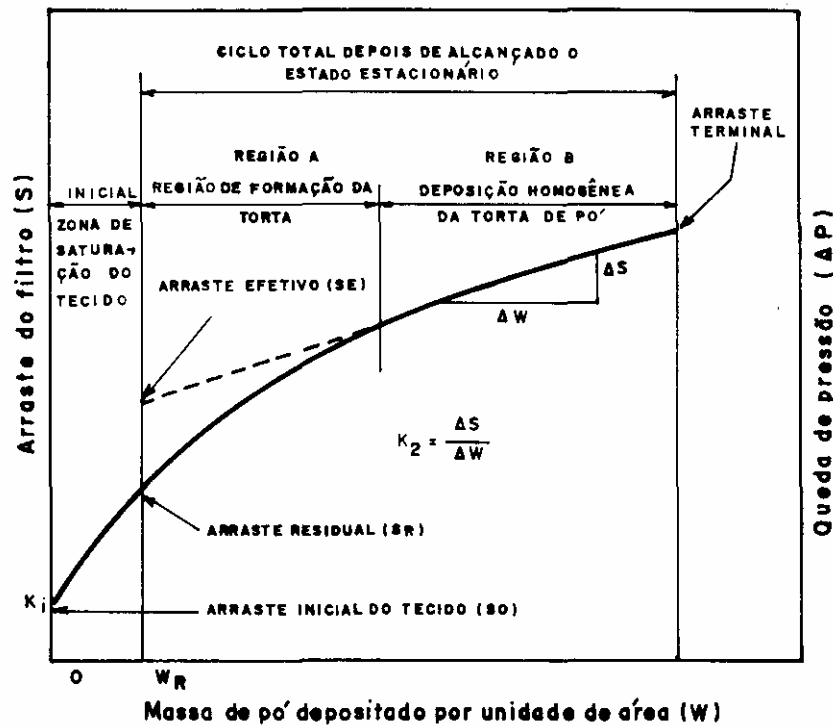


Figura 2.10 - Queda de pressão e força de arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área em um filtro de tecido (Fonte: Aguiar, 1991).

A equação (21) mostra uma relação linear entre o arraste (S) e massa de pó depositada por unidade de área (W), em que o arraste efetivo do filtro (S_E) é o coeficiente linear e a resistência específica da torta (k_2) é o coeficiente angular da curva.

Segundo Donovan (1985), as curvas de arraste ou filtração em função do tempo, podem apresentar três comportamentos distintos no início da filtração (zona de saturação); concavidade para baixo, o mais comum, concavidade para cima, especialmente em combinações de pó grosso e tecido de fibras finas, que domina o arraste inicialmente, e podem também apresentar um comportamento linear, que representa uma deposição superficial de pó estritamente uniforme e em série, ou seja, sem penetração de pó no tecido. Este último comportamento é raro e geralmente reportado como transitório. A Figura 2.11 ilustra os três comportamentos possíveis das curvas de arraste.

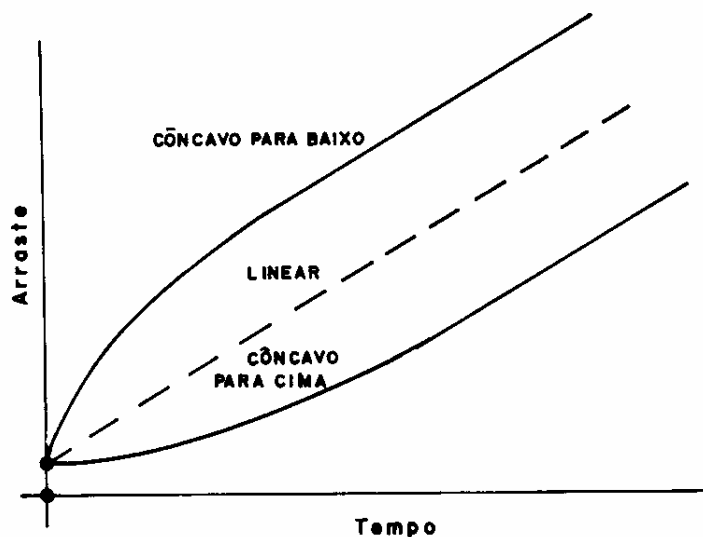


Figura 2.11 – Tipos de arraste inicial na filtração (Aguiar, 1991)

Uma das principais características das tortas de filtração é sua porosidade, sendo as principais relações desenvolvidas para obtenção da porosidade das tortas discutidas no item a seguir.

2.6 Porosidade da Torta

A porosidade das tortas de filtração é um parâmetro estrutural muito importante, visto que a força necessária para remover as tortas dos meios filtrantes e a queda de pressão no filtro dependem diretamente dela. Entretanto, devido à grande fragilidade das tortas, a sua medida experimental é muito difícil.

Coury & Aguiar (1995) apresentaram uma técnica experimental de determinação da porosidade de tortas de filtração adaptada do trabalho de Schmidt & Loffler (1990). Eles compararam os valores de porosidade média de uma torta, obtidos experimentalmente (método direto), com os valores obtidos através das equações encontradas na literatura (método indireto) e concluíram que as equações podem ser usadas para estimar a porosidade média da torta com razoável acuracidade. Das equações investigadas, a correlação de Ergun (1952) foi a que apresentou os melhores resultados e representa, portanto, a melhor maneira indireta de se estimar a porosidade de uma torta. Para uma torta de espessura L , composta de partículas com diâmetro médio d_p , a correlação de Ergun para a queda de pressão pode ser escrita como:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (22)$$

Considerando-se que a massa depositada M pode ser dada pela equação:

$$M = Q t \quad (23)$$

onde Q é a vazão mássica e t o tempo de filtração, pode-se ainda combinar esta equação com a equação (11) e se chegar a:

$$Q t = L A \rho_p (1 - \varepsilon) \quad (24)$$

rearranjando-se essa equação, pode-se definir L da seguinte forma:

$$L = \frac{Q t}{A \rho_p (1 - \varepsilon)} \quad (25)$$

que pode ser substituído na equação (22) para se chegar a:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150 (1 - \varepsilon) \mu Q V_f}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} + \frac{1,75 \rho_g Q V_f^2}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p} \quad (26)$$

que é a equação de Ergun escrita em função do tempo de filtração.

Tanto a equação (22) quanto a equação (26) são análogas à equação (1), sendo seus primeiros termos relativos ao componente viscoso e os segundos ao componente inercial. Considerando-se novamente desprezível o termo inercial no caso de escoamentos puramente viscosos, como nos gases, a equação (26) se reduz a:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1-\varepsilon)\mu Q V_f}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} \quad (27)$$

que é uma expressão para a Lei de Darcy em função da porosidade da torta.

A porosidade da torta determina o número de contatos partícula-partícula, o que está relacionado com a resistência de um aglomerado, o que é tratado no item a seguir.

2.7 Forças de Adesão

Segundo Rumpf (1962), se um aglomerado de partículas esféricas com diâmetro d_p é submetido a uma tensão normal σ , assume-se que esta tensão está relacionada com a soma das forças interparticulares individuais que agem nos pontos de contato das partículas e pode, portanto, ser expressa como:

$$\sigma = n F \quad (28)$$

onde n é o número de contatos partícula-partícula e F é a força média atuando nestes pontos de contato.

As forças de adesão partícula-partícula ou partícula-superfície foram discutidas por Zimon (1969), Visser (1978) e por Cross & Cetrônio (1978), que identificaram vários importantes fatores que influenciam estas forças, tais como, reações químicas, capilaridade, forças eletrostáticas e forças de Van der Waals, que são forças de ligação secundárias entre moléculas. No caso de aglomerados secos e inertes, sem a presença de agentes ligantes ou cargas eletrostáticas, a força resultante é normalmente a somatória das forças de Van der Waals (Coury & Aguiar, 1995), visto que, nestas condições, as

demais forças citadas podem ser consideradas desprezíveis. Hamaker (1937) propôs a expressão a seguir para exprimir as forças de Van der Waals entre duas partículas de diâmetros d_1 e d_2 :

$$F_{vw} = \frac{H(d_1 \cdot d_2)}{12 a^2 (d_1 + d_2)} \quad (29)$$

onde H é a constante de Hamaker, que é específica para cada material e é da ordem de 10^{-20} a 10^{-19} Joules e " a " é a distância de separação efetiva entre as duas partículas. Schubert (1981) mostrou que a menor distância possível entre duas partículas esféricas lisas seria de $4 \cdot 10^{-10}$ m e sugeriu que para partículas reais esta distância estaria entre $4 \cdot 10^{-10}$ e $4 \cdot 10^{-8}$ m, considerando-se que variações na área de contato, deformação superficial, irregularidades das partículas e grau de empacotamento podem afetar essa distância e conseqüentemente as propriedades de adesão.

Quando as duas partículas forem iguais e, portanto, tiverem o mesmo diâmetro d_p , a equação (29) se reduz a :

$$F_{vw} = \frac{H d_p}{24 a^2} \quad (30)$$

Pode-se também considerar que uma das partículas tem diâmetro muito maior que o da outra ($d_2 \gg d_1$), como no caso de uma interação partícula-parede, e então a equação (29) pode ser reduzida a:

$$F_{vw} = \frac{H d_1}{12 a^2} \quad (31)$$

onde d_1 é o diâmetro da partícula menor.

2.7.1 Teoria de Rumpf

De acordo com Rumpf (1962) a resistência limite de um aglomerado é alcançada quando as forças de separação impostas pela tensão normal (dada pela equação 17) se igualam às forças de adesão, concluindo-se assim que a ruptura de um aglomerado ocorre com a ruptura simultânea das n ligações interparticulares na superfície de ruptura. Desta forma, aplicando-se a equação (30) na equação (28), tem-se que a tensão de ruptura segundo Rumpf é dada por:

$$\sigma_r = \frac{n H d_p}{24 a^2} \quad (32)$$

Rumpf propôs também que o parâmetro n fosse dado pela expressão:

$$n = \frac{1,1(1 - \varepsilon)}{\varepsilon d_p^2} \quad (33)$$

substituindo-se essa equação na equação (32) chega-se a :

$$\sigma_r = \frac{0,046 (1 - \varepsilon) H}{\varepsilon d_p a^2} \quad (34)$$

que é a expressão final da tensão de ruptura de um aglomerado segundo a teoria de Rumpf.

2.8 Remoção da Torta

O ciclo de limpeza tem grande importância no desempenho do filtro e a maioria dos estudos a respeito deste processo tem concentrado seus esforços em conhecer os mecanismos específicos para cada técnica de limpeza utilizada, pelos quais as forças são induzidas no tecido. Para se remover a torta de um tecido, a força aplicada à torta deve ser maior que as forças que a ligam ao tecido, mas muito pouco é sabido a respeito destas forças (Leith & Allen, 1986).

O mecanismo de remoção da torta pode ser estudado considerando-se o balanço de forças em um elemento de volume da torta, conforme mostrado na Figura 2.12. A tensão total requerida para a remoção do elemento (σ_T) tem dois componentes: a primeira é a tensão normal à superfície da torta (σ_A) que é requerida para remover o elemento na interface com o tecido (área de adesão) e a segunda é a tensão de cisalhamento (σ_C) necessária para remover o elemento nas interfaces laterais (área de coesão) com o restante da torta. As forças que prendem o elemento ao tecido são denominadas de forças de adesão e mantêm unidas as partículas da torta aos componentes do tecido, enquanto que as forças que prendem o elemento ao restante da

torta são denominadas de forças de coesão e estão relacionadas à interação entre as partículas que formam a torta, sendo portanto dependentes da sua espessura (L_C).

A remoção da torta normalmente ocorre por um processo de limpeza por pedaços chamado “patchy cleaning” onde algumas áreas da torta são removidas inteiramente e outras não, como pode-se observar na Figura 2.12.

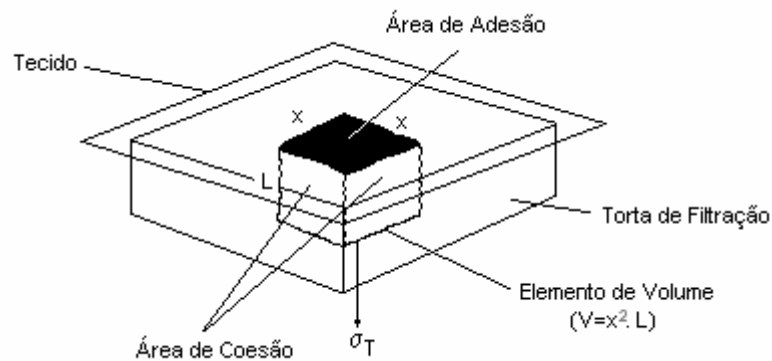


Figura 2.12 - Remoção de um elemento de volume da torta de filtração
(Fonte Leith & Allen, 1986)

Na verdade, pouco se sabe porque tantas tortas de filtração sob condições de escoamento de limpeza moderada apresentam este comportamento de remoção por pedaços (“patchy cleaning”). É certo que a porosidade tanto do meio filtrante como da torta não são uniformes. No entanto, há evidências experimentais de que o tamanho dos pedaços removidos aumenta sistematicamente com a massa de pó depositada, sendo portanto, de acordo com Koch et al. (1996), de fundamental importância no estudo da remoção de tortas.



Figura 2.13 – Fenômeno de “patchy cleaning” durante a limpeza de filtros por fluxo de ar reverso.

SEVILLE et al. (1989) notaram que o “patchy cleaning” varia com as condições operacionais. A compressão da torta que ocorre a altas velocidades, grandes massas de torta e altas temperaturas podem influenciar a fração limpa e o modo de ocorrência do “patchy cleaning”.

Neste trabalho, para determinação da tensão de remoção da torta, foi utilizado o método proposto por Seville et al. (1989) que é descrito no próximo item.

2.8.1 Determinação da Força de Remoção da Torta

Seville et al.(1989) propuseram um método para estimar a força de remoção da torta a partir de uma análise do trabalho de Sievert & Loeffler (1987). Considerando-se que o escoamento do gás no sentido reverso ao da filtração tem comportamento idêntico ao processo inverso até que se atinjam condições críticas para a remoção da torta, o equacionamento é análogo ao da filtração. Assumindo-se que a ruptura da torta se dá na interface torta-tecido (Lucas, 2000), a equação (18) no processo de remoção da torta resulta em:

$$\Delta P_{Tc} = k_1 V_c + \Delta P_{Cc} \quad (35)$$

onde ΔP_{Tc} é a queda de pressão na limpeza, k_1 a resistência específica do meio filtrante, V_c é a velocidade superficial do gás na limpeza e ΔP_{Cc} é a queda de pressão na torta nas condições críticas de remoção na limpeza.

A equação (35) estabelece que a queda de pressão na limpeza (ΔP_{Tc}) varia linearmente com a velocidade de limpeza (V_c), tendo a resistência específica do tecido (k_1) como coeficiente angular e a queda de pressão em função da torta (ΔP_{Cc}) como coeficiente linear.

Assim, pelo método proposto por Seville et al. (1989), pode-se determinar a força de remoção da torta (F_c) se os valores da queda de pressão parciais de limpeza (ΔP_{Pc}) forem plotados em função da velocidade de limpeza (V_c) para se obter, por extrapolação, a queda de pressão em função da torta (ΔP_{Cc}), que é o coeficiente linear da curva, sendo a inclinação, ou coeficiente angular da curva, a resistência específica do tecido (k_1); conforme se observa na Figura 2.14.

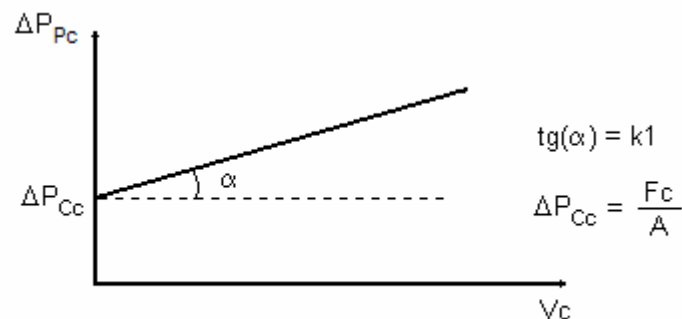


Figura 2.14 - Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza

Multiplicando-se a queda de pressão em função da torta (ΔP_{Cc}) pela área de filtração (A), obtém-se a força de remoção da torta (F_C).

No próximo capítulo são descritos os equipamentos, materiais e métodos utilizados nos procedimentos experimentais necessários para a realização deste trabalho.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos itens a seguir são relacionados os equipamentos, materiais e métodos que foram utilizados nos procedimentos experimentais para determinação da tensão de remoção das tortas, realização dos ciclos de limpeza, caracterização do material pulverulento e caracterização dos tecidos de filtração.

3.1 Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados nos procedimentos experimentais de filtração, limpeza de filtros e caracterização de materiais são descritos a seguir.

3.1.1 Equipamentos Usados para Filtração e Limpeza

A Figura 3.1 mostra uma visão geral do equipamento de filtração e limpeza utilizado neste trabalho, constituído por alimentador de pó, caixa de filtração, soprador, ar comprimido, micromanômetros digitais e sistema de controle. Este equipamento já estava disponível no laboratório do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, tendo sido utilizado também em outros trabalhos anteriores.

Para controle da umidade, o ar comprimido passava por dois desumidificadores de sílica gel antes de entrar em contato com o pó, para sugá-lo e conduzi-lo para a caixa de filtração, onde a torta era formada.

Para controle da rotação do soprador foi instalado um transdutor junto ao mesmo, garantindo assim uma velocidade de filtração constante durante a condução dos experimentos tanto de filtração, como de remoção da torta.

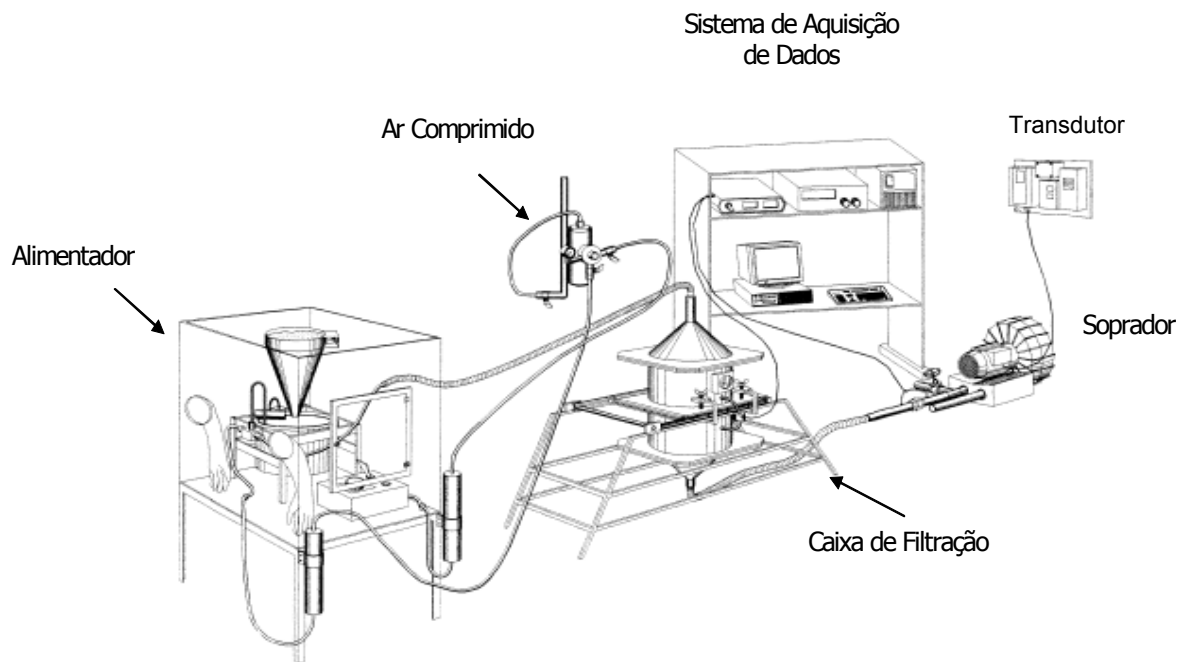


Figura 3.1 - Esquema geral do equipamento de filtração e limpeza

3.1.2 Caixa de Filtração

A deposição de pó e a remoção da torta do meio filtrante ocorria na caixa de filtração, que era constituída de dois cilindros de PVC com uma gaveta entre eles onde, entre duas molduras de aço inoxidável, o meio filtrante era inserido, conforme mostrado na Figura 3.2.

O meio filtrante era de forma circular, com 17 cm de diâmetro e área útil de filtração de 226,98 cm².

Durante a filtração a caixa de filtração ficava na posição vertical, com o filtro em seu interior na posição horizontal, e durante a limpeza a caixa ficava na posição horizontal e o filtro na vertical.

Dois tomadores de pressão eram situados antes e após a passagem do fluxo pelo filtro, fornecendo dados que eram enviados para o sistema de controle através de micromanômetros digitais.

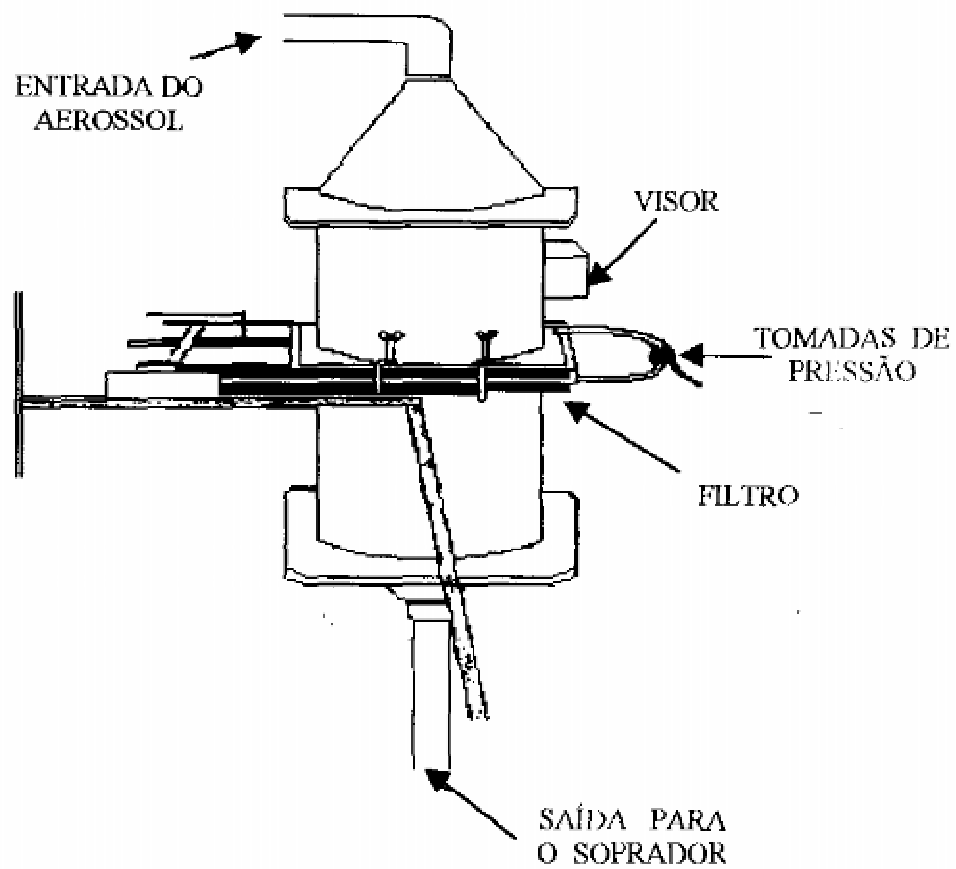


Figura 3.2 – Caixa de filtração

3.1.3 Alimentador de Pó

O alimentador de pó do tipo prato giratório, conforme mostrado na Figura 3.3, foi envolvido por uma caixa de acrílico, para manter a umidade interna tão baixa quanto

possível. O equipamento consistia em um prato com sulco de perfil semicircular em seu contorno, que girava em torno de seu próprio eixo. O sulco era preenchido de pó quando o prato girava e passava sob um reservatório na forma de cone, que vibrava pela ação de um motor.

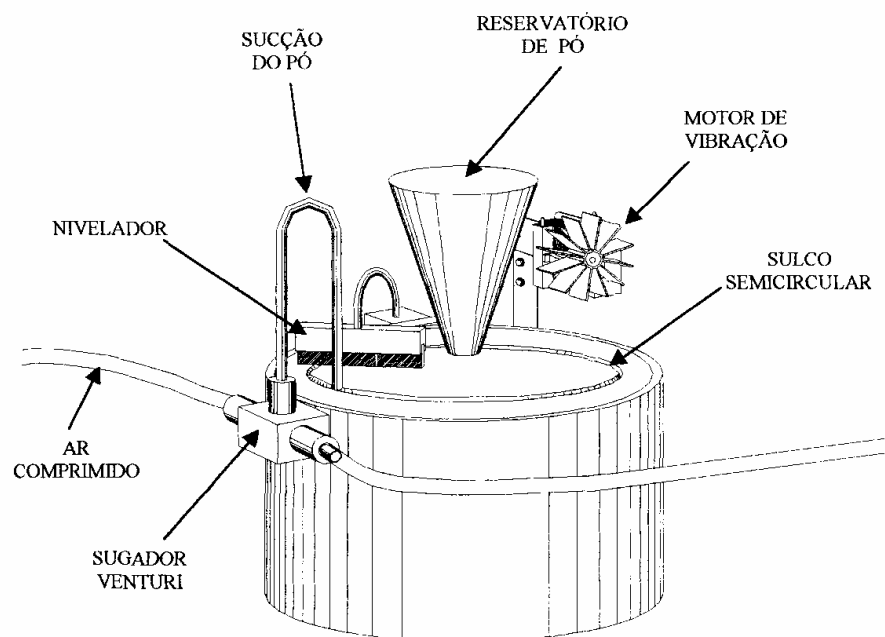


Figura 3.3 – Alimentador de pó

O alimentador possuía também um controlador de velocidade expresso em porcentagem da velocidade máxima de giro do prato, que permitia a variação da vazão de alimentação. Nos experimentos realizados utilizou-se a vazão de pó correspondente a 11% da velocidade máxima de giro do prato, proporcionando uma vazão mássica de pó de 0,02 g/s.

3.1.4 Sistema de Controle

O sistema de controle e aquisição de dados era constituído por um microcomputador 486 DX2, provido de uma placa para aquisição de dados para computadores compatíveis com o padrão IBM-PC, que permitia a leitura de 16 sinais de sensores externos e controle de dois atuadores analógicos e 24 linhas de entrada e saída digitais (tipo liga-desliga). O software que controlava o experimento e realizava o registro das variáveis de interesse, foi elaborado na linguagem Visual Basic 3.0 especialmente para este tipo de aplicação.

O software atuava na rotação do motor de modo a permitir que o ar fosse sugado ou soprado e a manter as velocidades superficiais de filtração e de limpeza constantes. Durante a filtração ocorre um aumento contínuo da perda de carga, que tende a diminuir a vazão de ar e, para evitar isso, o software acelera a rotação do motor, mantendo a velocidade de ar constante. Este controle era feito pela placa de aquisição de dados e por uma placa de orifício calibrada colocada na linha entre dois medidores de pressão que eram ligados aos micromanômetros digitais.

Para registro das variáveis, a perda de carga era instrumentada por um sensor de pressão e lida pela placa de aquisição de dados, sendo registrada juntamente com o tempo e a velocidade.

3.1.5 – Outros Equipamentos

Outros equipamentos utilizados neste trabalho foram um analisador de granulometria marca Mastersizer Malvern Microplus v.2.19, para obtenção da granulometria do pó; uma balança digital Marte Modelo AM5500 para pesagem dos filtros e porções removidas de pó; um analisador de porosidade marca Quantachrome Modelo Poremaster 33-6, para medida da permeabilidade dos meios filtrantes; um

picnômetro de Hélio marca Micrometrics, para determinação da densidade do material pulverulento e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Carl-Zeiss modelo DSM-940-A do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar (CCDM), para obtenção de micrografias dos tecidos.

3.2 Materiais

Os materiais estudados e utilizados nos procedimentos experimentais deste trabalho são descritos nos subitens a seguir.

3.2.1 Meios Filtrantes

Os tecidos utilizados neste trabalho como meios filtrantes foram os mesmos que são empregados na fabricação de filtros manga industriais; o polipropileno, um feltro de fibras sintéticas, e o algodão, um tecido trançado de fibras naturais. Esses tecidos foram fornecidos pela empresa Gino Cacciari, cujas características de especificação informadas por esse fabricante são descritas a seguir.

a) Tecido de Polipropileno

O tecido de polipropileno utilizado foi o de código 3008 PP, constituído de fibra de 100% polipropileno, com contextura de feltro agulhado, acabamento calandrado e chamuscado de um lado, gramatura (G) de 0,600 kg/m², espessura (L_F) entre 2,5 e 2,8 mm, ponto de fusão (MP) de 152 a 170 °C e temperatura de trabalho (T_W) de até 90°C.

b) Tecido de Algodão

O tecido de algodão utilizado foi o de código 2032, constituído de fibras de 100 % algodão, com contextura granite, acabamento cru, gramatura (G) de 0,735 kg/m²,

espessura nominal (L_F) de 1,6 mm, sem ponto de fusão, com temperatura de amarelecimento da fibra de 120°C, decompondo-se acima de 150°C e temperatura de trabalho (T_W) de até 90°C (calor seco).

3.2.2 Material Pulverulento

O material pulverulento utilizado para filtração foi um material inorgânico, o concentrado fosfático de Patos de Minas - MG, fornecido pela Fosfértil S.A., que possuía cor marrom acinzentado. A densidade obtida no picnômetro de Hélio para o material não filtrado foi de 2,79 g/cm³ e o diâmetro médio de Stokes das partículas, obtido no Malvern, foi de $4,55 \times 10^{-6}$ m. A distribuição granulométrica do pó é apresentada na Figura 3.4.

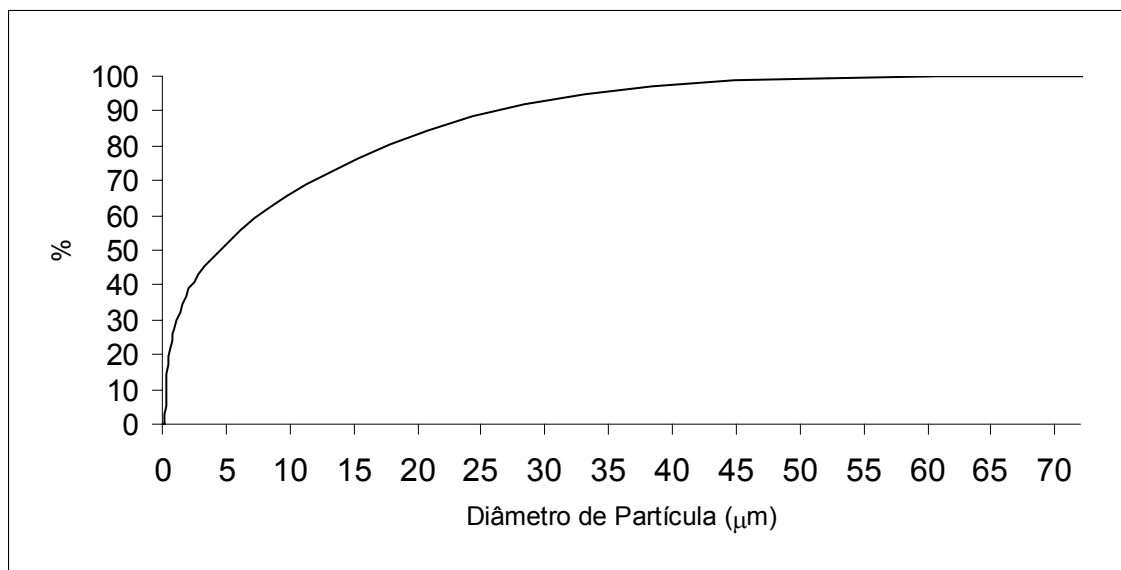


Figura 3.4 – Variação da % acumulada em volume em função do diâmetro de partícula para o concentrado fosfático de Patos de Minas, obtida no Malvern

3.3 Procedimento Experimental Principal

3.3.1 Filtração

O procedimento de filtração consistiu na passagem do gás, contendo o material pulverulento disperso em seu meio, através do meio filtrante, que retém as partículas do pó em sua superfície, formando assim uma torta de filtração.

Para a realização do procedimento de filtração, inicialmente verificava-se a rotação do prato do alimentador de pó, que era ajustado para girar com velocidade correspondente a 11% de sua velocidade de rotação máxima, o que corresponde a uma rotação a cada 1 minuto e 40 segundos.

Em seguida, o pó era depositado no reservatório cônico de pó e homogeneizado com o auxílio de uma espátula. Em seguida, a caixa de acrílico, onde o alimentador de pó ficava, era fechada e o ar comprimido ligado alimentando o interior da caixa com ar praticamente seco (de 10 % a 15 % de Umidade Relativa).

A amostra do meio filtrante era então cortada na forma circular, com diâmetro total de 18 cm, pesada e encaixada no rebaixo existente entre os suportes metálicos da caixa de filtração, que eram juntados com a amostra entre eles e inseridos na gaveta da caixa, e apertados através de grampos de fixação.

No sistema de controle era ajustada a velocidade de filtração do experimento, que era mantida constante durante o procedimento por meio de um transdutor que controla a rotação do soprador.

Feitos os ajustes e posicionamentos, eram simultaneamente acionados o soprador, para sugar o ar da caixa de filtração, e o alimentador de pó, para dispersar o pó no ar sugado, iniciando-se o procedimento de filtração. Assim, o ar sujo era sugado, através de um dispositivo tipo Venturi, para o interior da caixa de filtração, passando através do meio filtrante, levando assim à deposição das partículas do material pulverulento em sua superfície e, conseqüentemente, à formação da torta de filtração.

A filtração era mantida até que a queda de pressão atingisse o valor pré-determinado para o experimento.

Para cada tipo de tecido experimentado, foram realizadas filtrações com velocidades de 4,5; 6,0; 7,5 e 9,0 cm/s, até que fossem atingidas quedas de pressão de 300, 400 e 500 mmH₂O, formando assim tortas de três espessuras diferentes em cada velocidade de filtração. Foram realizadas algumas réplicas dos experimentos para se comprovar a sua reprodutibilidade.

3.3.2 Remoção da Torta

O processo de remoção da torta de filtração foi pelo método de fluxo de ar reverso, que consiste na passagem do fluxo de ar através do meio filtrante no sentido inverso ao da filtração, para remover a torta formada na superfície do tecido.

Para a realização do procedimento de remoção da torta pelo método de fluxo de ar reverso, primeiramente, após a filtração, era retirada a tampa superior da caixa de filtração, que era colocada na posição horizontal e todo o pó depositado nas suas paredes era removido com o auxílio de um pincel e uma espátula, ficando material particulado depositado somente na superfície do meio filtrante, ou seja, na torta de filtração formada que, após o posicionamento da caixa, estava na posição vertical. Uma folha de papel limpo e previamente pesada era colocada na parte inferior da caixa de filtração para servir como coletor do pó removido da torta no processo de limpeza do meio filtrante.

Em seguida, a placa de orifício, posicionada no duto que liga o soprador à caixa de filtração, era invertida e o soprador, através do sistema de controle, era ajustado para

soprar o ar em vez de sugá-lo, proporcionando o fluxo reverso de ar para a limpeza. A velocidade de limpeza era também ajustada através do sistema de controle.

Feitos os ajustes e posicionamentos, o soprador era então acionado para a realização da limpeza na velocidade programada. Após o alcance da velocidade de limpeza programada, o processo era mantido por dois minutos, sendo registrada a queda de pressão parcial de limpeza (ΔP_{pc}) informada pelo sistema de controle ao final deste tempo. O papel com o pó removido da torta era então pesado para obtenção do peso de pó removido na velocidade de limpeza aplicada (descontando-se o peso do papel). O aspecto visual da torta após a remoção era também avaliado e a classe das placas removidas era registrado de forma qualitativa (fina, média, grossa ou muito grossa).

O procedimento de limpeza era repetido em etapas sucessivas de limpeza em cada torta, utilizando-se nessas etapas as velocidades de limpeza de 1,6; 3,0; 9,0; 12,0; 15,0 e 18,0 cm/s. Entretanto, em função de limitações do equipamento e características do tecido, a primeira velocidade de limpeza nos ensaios realizados com o filtro de polipropileno sempre foram superiores a 1,6 cm/s, chegando a valores situados na faixa entre 2,2 e 2,8 cm/s, dependendo da espessura de torta submetida ao processo de limpeza, sendo esses os valores mínimos de velocidade de limpeza que se conseguiu obter nesses casos.

3.4 Cálculos

Os métodos de cálculo e estimativa de parâmetros utilizados neste trabalho, para o processo de limpeza do tecido em etapas, com variação da velocidade de limpeza em cada etapa de remoção da torta, são apresentados a seguir.

3.4.1 Cálculo e Estimativa da Força de Adesão por Unidade de Área

A tensão de remoção entre a torta e o tecido foi definida como sendo a força de adesão por unidade de área; para encontrá-la utilizou-se o método proposto por Seville et al. (1989), através da grandeza chamada fração de massa retida na torta (γ), que é dada pela razão da massa de pó retida na torta por unidade de área após a limpeza (W_R) pela massa total depositada por unidade de área (W).

Para aplicação do método, calculou-se a fração parcial de torta retida (γ_P) após cada etapa de limpeza, que é dada pela razão da massa de pó retida por unidade de área após a aplicação de cada velocidade de limpeza (W_{Ri}) pela massa total depositada por unidade de área (W), utilizando-se o peso do filtro, das frações removidas de torta após a limpeza em cada velocidade e o peso do filtro com a massa final retida, para cada espessura de torta utilizada.

Os valores de velocidade de limpeza (V_c) foram plotados em função das frações parciais de torta retida (γ_P) correspondentes, obtendo-se assim curvas para cada espessura de torta utilizada em gráficos específicos para cada velocidade de filtração empregada, conforme mostra o exemplo apresentado na Figura 3.5.

Da mesma forma, os valores das quedas parciais de pressão de limpeza (ΔP_{Pc}) foram plotados em função das frações parciais de torta retida (γ_P) correspondentes, obtendo-se também gráficos para cada velocidade de filtração utilizada, com curvas correspondentes a cada espessura de torta obtida na filtração, conforme mostra o exemplo da Figura 3.6.

Em seguida, arbitrou-se valores de fração de massa retida no gráfico da Figura 3.5, encontrando-se, por extrapolação gráfica, os valores de velocidade de limpeza correspondentes, como mostra essa figura.

Utilizando-se os mesmos valores de fração de massa retida obtidos na Figura 3.6 encontrou-se, também por extrapolação gráfica, os valores correspondentes de queda de pressão de limpeza. A seguir, montou-se uma tabela com os valores de velocidade de limpeza, queda de pressão de limpeza e fração de massa retida.

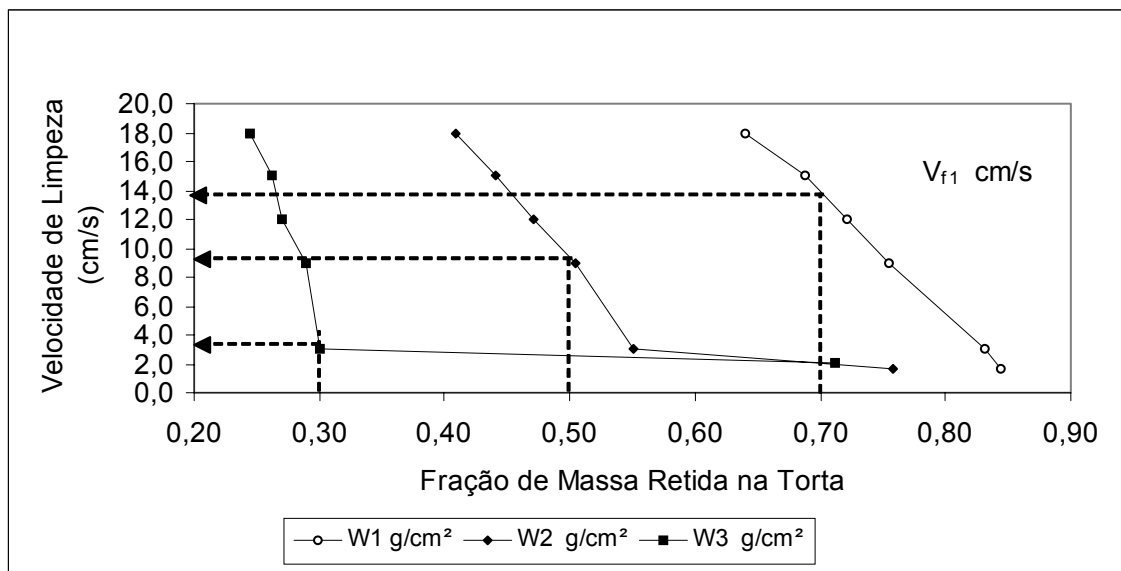


Figura 3.5 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta

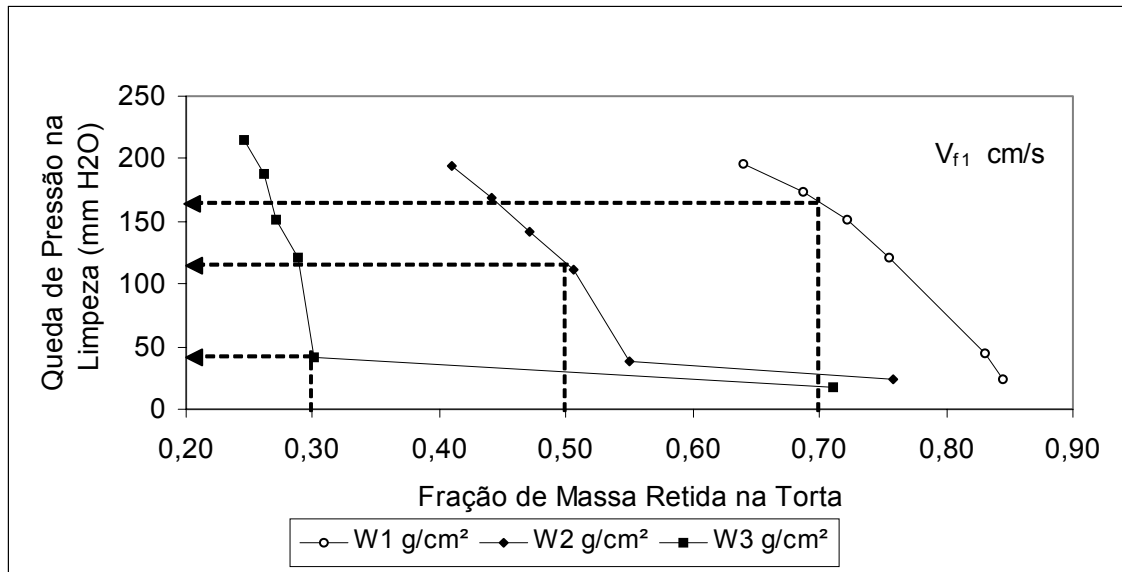


Figura 3.6 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta

Utilizando-se os dados da tabela montada, construiu-se um gráfico conforme o modelo mostrado na Figura 3.7, de velocidade de limpeza em função da queda de pressão de limpeza. Realizou-se então um tratamento estatístico, denominado de regressão linear, para se obter uma curva representativa da variação da queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza, que é a reta pontilhada apresentada na Figura 3.7. Pelo método proposto por Seville et al. (1989), o coeficiente linear dessa reta corresponde à força de adesão por unidade de área, como estabelecido na equação (35), e é o valor de queda de pressão obtido pelo prolongamento da reta até o eixo das ordenadas.

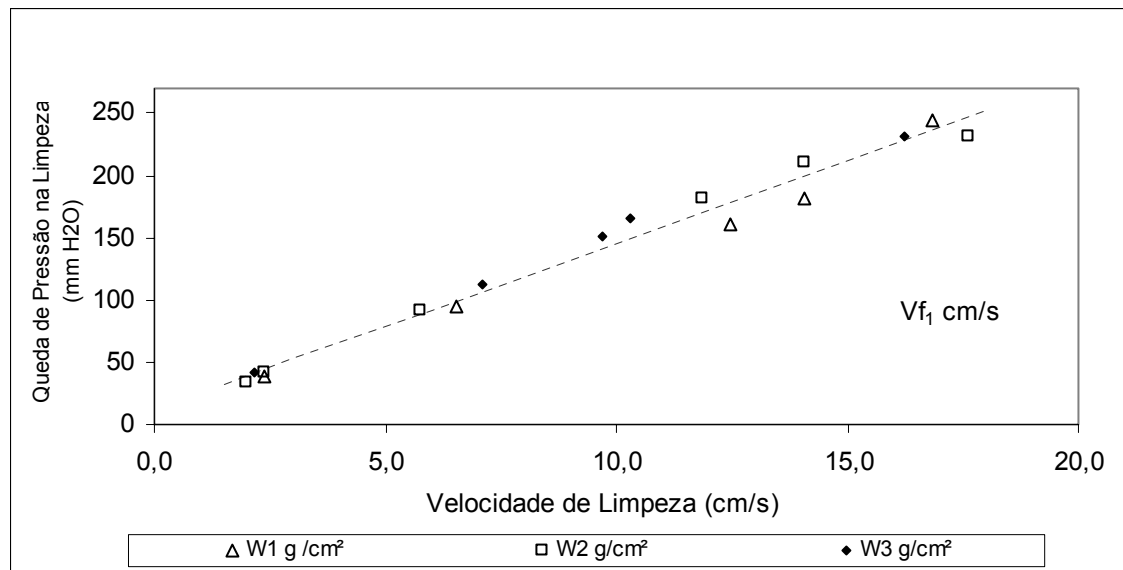


Figura 3.7 – Exemplo de gráfico para estimativa da tensão de remoção

3.4.2 Cálculo do Arraste e da Massa de Pó Depositada

Para construção dos gráficos de arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área, inicialmente foi obtido o arraste instantâneo na filtração (S_i) dividindo-se a queda de pressão de filtração instantânea (ΔP_i) pela velocidade de filtração (V_f).

Em seguida foi calculada a massa de pó instantânea depositada por unidade de área (W_i), multiplicando-se a vazão mássica (Q) pelo tempo de filtração (t) e dividindo-se este produto pela área de filtração (A).

Os dados de arraste instantâneo foram então plotados em função da massa de pó instantânea depositada por unidade de área para obtenção das curvas de filtração.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nos procedimentos experimentais de caracterização dos meios filtrantes, ciclos de filtração e limpeza, filtração e remoção realizados são apresentados neste capítulo nos itens a seguir, em que são também discutidos os detalhes e conclusões resultantes dos dados obtidos.

4.1 Caracterização dos Meios Filtrantes

Para caracterização dos meios filtrantes, inicialmente foram obtidas micrografias da superfície dos tecidos no microscópio eletrônico de varredura que são apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

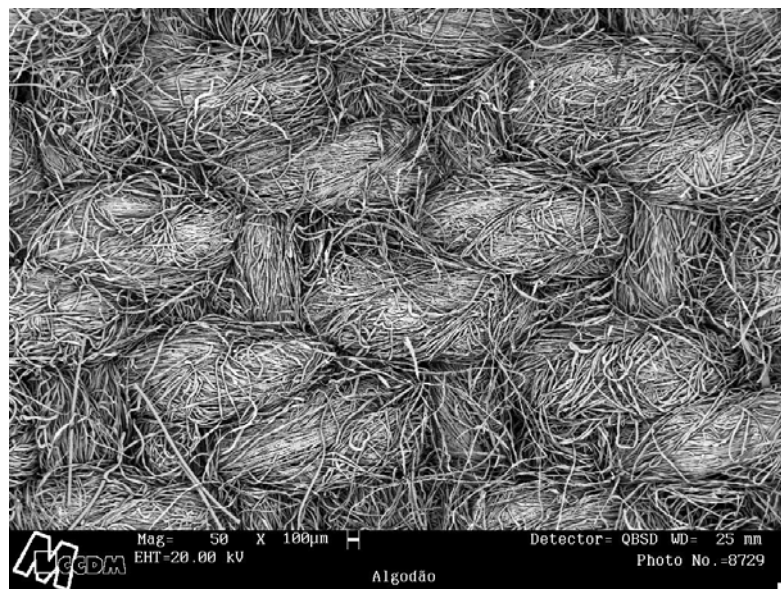


Figura 4.1 – Textura da superfície do tecido de algodão, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes

Na Figura 4.1, observa-se a textura da superfície do tecido de algodão, onde se vê a trama dos fios do tecido, que é do tipo sarja 2/1, conforme definido na Figura 2.2, sendo o mesmo um tecido bastante fechado sem vazios entre os fios.

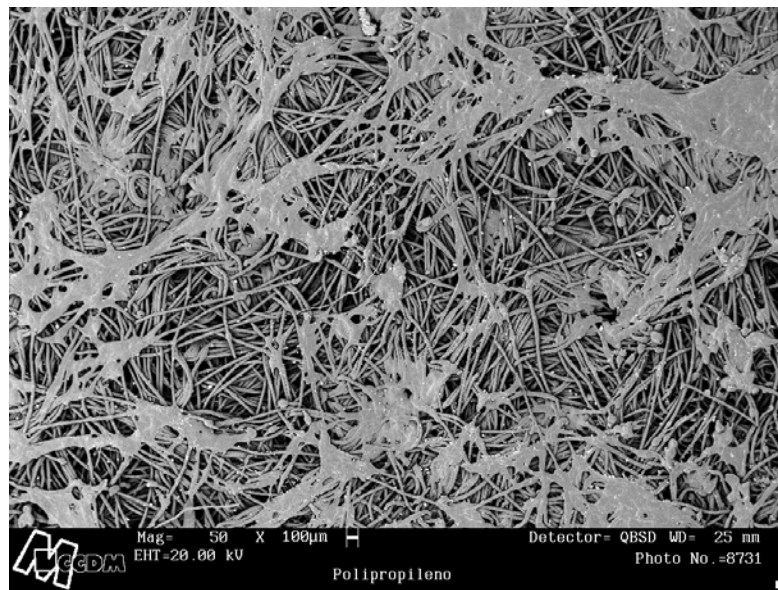


Figura 4.2 – Textura do feltro de polipropileno, obtida no MEV do CCDM, com aumento de 50 vezes

Na Figura 4.2, observa-se a textura do feltro de polipropileno, em que se vê o arranjo desordenado das fibras do tecido, com a presença de muitos espaços vazios no empacotamento (poros). Observa-se também diversas áreas com fibras fundidas resultantes dos tratamentos de chamuscamento e calandragem.

As figuras 4.3 e 4.4 apresentam micrografias mais ampliadas das superfícies dos tecidos para avaliação das fibras dos tecidos, em que pode-se observar maiores detalhes das fibras que constituem os tecidos.



Figura 4.3 – Fibras do tecido de algodão, micrografia obtida no MEV do CCDM, com aumento de 2.500 vezes

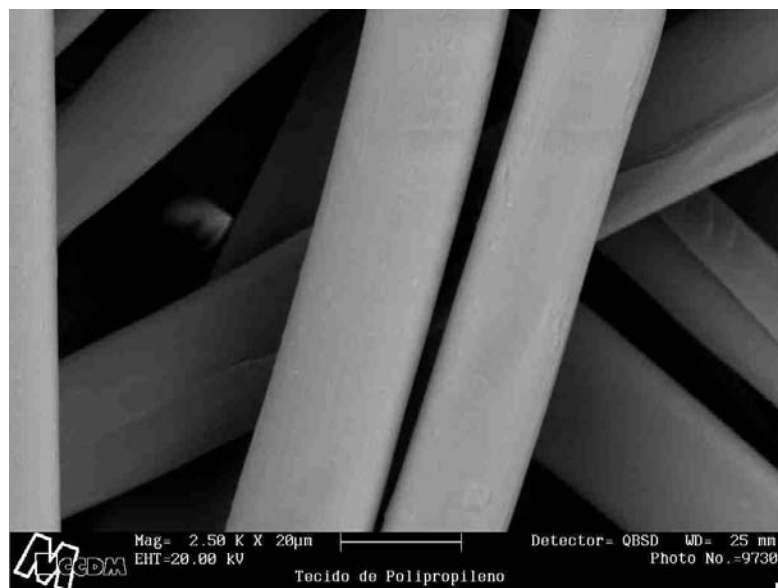


Figura 4.4 – Fibras do tecido de polipropileno, micrografia obtida no MEV do CCDM, com aumento de 2.500 vezes

Na Figura 4.3 observa-se que as fibras do tecido de algodão são achatadas e retorcidas, com diâmetro pouco uniforme variando entre 7 e 19 μm (estimado pelo método descrito por Martins, 2001, e em função da escala da micrografia) e com

algumas protuberâncias na sua superfície. Na Figura 4.4, observa-se que as fibras do polipropileno apresentam acabamento mais liso do que as do algodão, sendo também mais arredondas e de diâmetro mais uniforme e maior do que as do algodão, variando entre aproximadamente 20 e 22 μm .

Avaliou-se também a porosidade dos tecidos obtendo-se, através do porosímetro Quantachrome Poremaster V. 4.03, valores de porosidade de 0,7991 para o tecido de polipropileno e de 0,5761 para o tecido de algodão, o que caracteriza quantitativamente o tecido de polipropileno como sendo o meio mais poroso entre os estudados, o que se pode observar qualitativamente nas Figuras 4.1 e 4.2.

4.2 Ciclos de Filtração e Limpeza

As Figuras 4.5 e 4.6 mostram as curvas de filtração sequenciais após os ciclos de limpeza do tecido de fibras de polipropileno, com textura de feltro agulhado e do tecido de fibras de algodão, com textura granite. Nestes experimentos utilizou-se velocidade de filtração de 6,0 cm/s até alcançar a queda de pressão de 400 mmH₂O em cada etapa de filtração, com vazão de pó constante. A velocidade de limpeza foi de 18 cm/s em todos os testes de limpeza.

Observa-se na Figura 4.5 que a queda de pressão inicial da filtração, decorrente do filtro após a limpeza da torta, para o tecido de polipropileno estabilizou-se em torno de 490 N/m² após a realização do quinto ciclo de filtração e de limpeza. Para o tecido de algodão, observa-se na Figura 4.6 que a estabilidade foi alcançada após o terceiro ciclo, com queda de pressão inicial em torno de 980 N/m². A estabilidade indica a saturação do tecido com o material pulverulento após estes ciclos e, por esse motivo, não foram conduzidos outros testes de filtração e de limpeza após ser alcançada em cada um dos

tecidos. Estes resultados indicam que o tecido de polipropileno levou mais tempo para saturar, ou seja, ser impregnado com o pó, que não mais é removido no processo de limpeza. Isso pode estar relacionado com a maior facilidade de limpeza apresentada pelo polipropileno, discutida no item 4.4, o que pode levar a uma maior dificuldade de impregnação do tecido pelo pó, visto que frações de torta retida após limpeza neste tecido foram sempre menores do que no algodão.

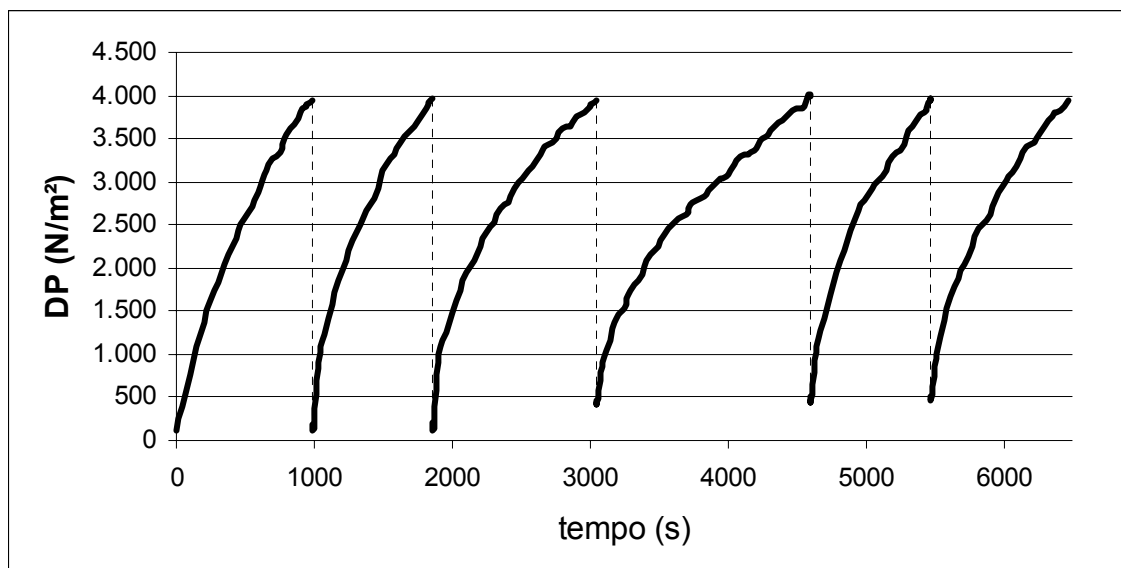


Figura 4.5 - Curvas de filtração sequenciais dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de polipropileno, para queda de pressão de filtração de 3.920 N/m^2 , velocidades de filtração de $6,0 \text{ cm/s}$ e de limpeza de $18,0 \text{ cm/s}$

Também observa-se na Figura 4.6, que a queda de pressão inicial no primeiro ciclo de filtração para o tecido de algodão foi de 657 N/m^2 , foi bem maior do que a apresentada no primeiro ciclo de filtração para o tecido de polipropileno, que foi de 108 N/m^2 (Figura 4.5), levando a um arraste inicial do tecido de algodão, obtido pela divisão da queda de pressão inicial do primeiro ciclo pela velocidade de filtração, de $1,1 \times 10^6 \text{ N.s/m}^3$ que também é bem maior do que o calculado para o polipropileno, que foi de $1,8$

$\times 10^5 \text{ N.s/m}^3$, mostrando assim que o tecido de algodão é mais fechado que o de polipropileno. Isso quer dizer que o coeficiente de permeabilidade do tecido de polipropileno é bem maior do que o de algodão, o que é decorrente da maior porosidade do polipropileno. Observou-se também que o tecido de polipropileno tem uma espessura média de 2,75 mm, que é quase o dobro da espessura média do algodão, que é de 1,60 mm. Esta proposição fica evidente quando se compara as fotografias das texturas dos tecidos apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2, em que se nota que o tecido de algodão é nitidamente mais fechado que o tecido de polipropileno, e pelos resultados da avaliação quantitativa da porosidade dos tecidos apresentados no item 4.1, que indicam porosidade maior para o tecido de polipropileno.

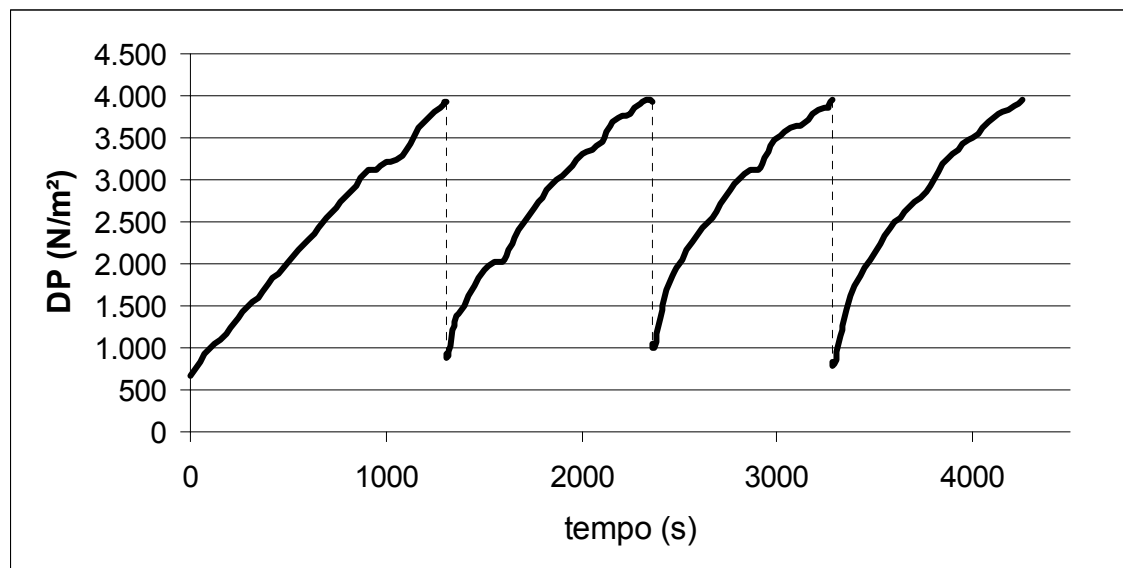


Figura 4.6 - Curvas de filtração seqüenciais dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de algodão, para queda de pressão de filtração de 3.920 N/m^2 , velocidades de filtração de $6,0 \text{ cm/s}$ e de limpeza de $18,0 \text{ cm/s}$

Observa-se ainda nas Figuras 4.5 e 4.6, que o tempo de filtração para se atingir a queda de pressão planejada no primeiro ciclo ($400 \text{ mmH}_2\text{O}$) foi menor para o

polipropileno (aproximadamente 1.000 segundos) do que para o algodão (aproximadamente 1.200 segundos), mostrando a formação nestes ciclos de uma torta mais compacta no polipropileno do que no algodão e que a porosidades menor do filtro de algodão não resulta em tempo de filtração menor. Por outro lado, após a saturação dos tecidos, houve estabilização dos tempos de filtração para ambos os tecidos na faixa de 900 a 1.000 segundos.

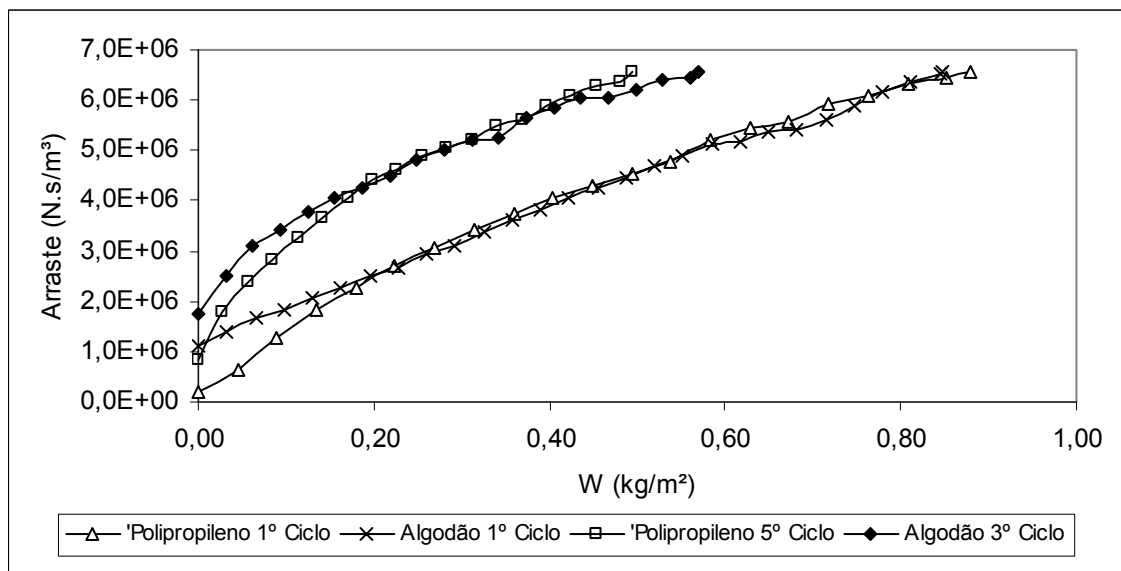


Figura 4.7 – Arrastes comparativos para os ciclos de filtração e limpeza iniciais e de saturação dos tecidos de polipropileno e algodão, obtidos com velocidade de filtração de 6,0 cm/s e vazão mássica de pó de 0,02 g/s

Como se observa na Figura 4.6, em que se apresentam as curvas de filtração comparativas entre os ciclos de filtração e limpeza iniciais e entre os ciclos em que ocorreu a saturação dos respectivos tecidos, 5º para o polipropileno e 3º para o algodão, a diferença de arraste inicial tendeu a se uniformizar com a formação da torta, visto que as curvas correspondentes ao algodão e ao polipropileno se sobrepuseram à medida que as tortas foram formadas, revelando que o preenchimento dos poros do tecido de polipropileno leva a uma diminuição da permeabilidade do meio filtrante.

Na Figura 4.7 pode-se observar também que o arraste inicial de ambos os tecidos aumentou com a realização dos ciclos, i.e., foram maiores nos ciclos de saturação do que nos primeiros ciclos, o que era de se esperar pois os tecidos foram sendo saturados a cada ciclo realizado, transformando o meio filtrante em outro mais fechado e de maior arraste.

Os dados relativos aos ciclos de filtração discutidos nesta seção são apresentados no Apêndice A .

4.3 Filtração

Nas Figuras 4.8 e 4.9 apresentam-se curvas de arraste (S) em função da massa de pó depositada por unidade de área (W) geradas para a velocidade de filtração de 4,5 cm/s, variando-se a queda de pressão final de filtração ou espessura da torta, obtidas durante os experimentos de cada um dos tecidos estudados. Observa-se nas Figuras 4.8 e 4.9 que as inclinações das curvas de arraste (S) de um mesmo tipo de filtro são equivalentes, sendo também observado na Figura 4.8, para o polipropileno, um certo distanciamento, da curva de arraste da torta de espessura de 1,220 kg/m² das demais curvas, o que pode ser decorrente de um maior valor de umidade relativa do ar ambiente no momento da realização deste ensaio, que estava acima de 50% enquanto que nas outras curvas estava abaixo desse valor, embora a umidade relativa no interior do alimentador de pó tenha sido mantida na faixa de 10 a 15% para todos os experimentos. Porém, na região linear, não se observa variações importantes na inclinação das curvas, indicando taxas equivalentes de crescimento da torta nesta região. Por outro lado, as curvas de arraste para o tecido de algodão, apresentadas na Figura 4.9, estão mais

próximas entre si, o que também pode ser influência da umidade relativa do ar ambiente, visto que em todos esses ensaios estava abaixo de 50%.

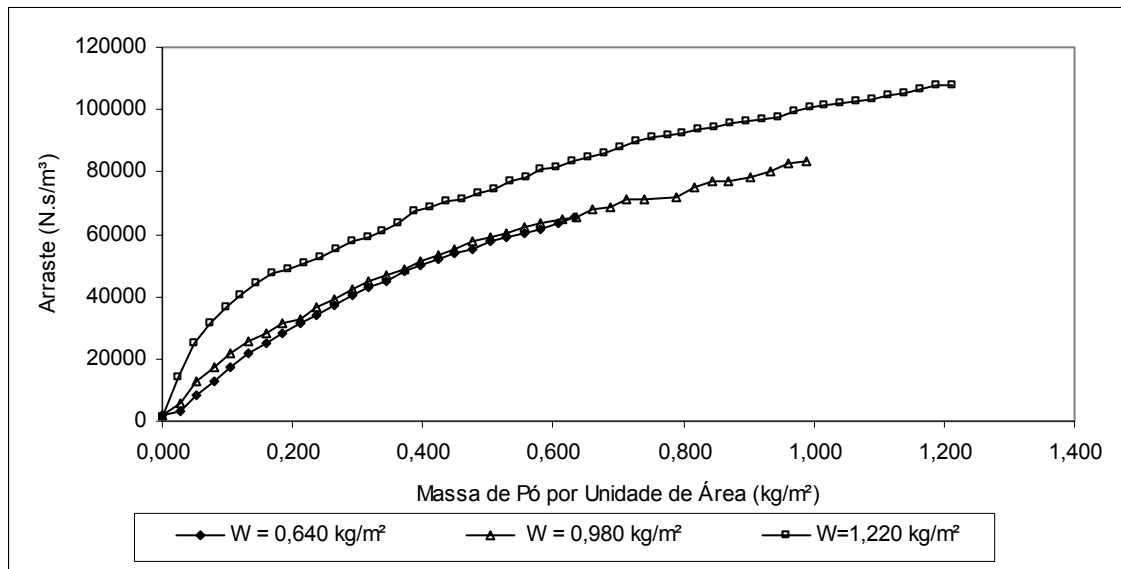


Figura 4.8 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 4,5 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)

Observa-se ainda nas Figuras 4.8 e 4.9 que as curvas obtidas nos experimentos com o filtro de polipropileno apresentam, no início da filtração na região de formação da torta uma curva não linear, enquanto que as curvas obtidas para o algodão são praticamente lineares. Depois que uma quantidade de massa foi depositada nos tecidos, as curvas para o polipropileno apresentam forma linear, ou seja, uma deposição mais homogênea de pó na torta. Já para o algodão, as curvas continuaram com a mesma inclinação. Esta diferença, segundo Dennis & Dirgo (1981), ocorre devido a variações das propriedades da superfície do tecido, da torta ou ainda devido à compressão do tecido ou da torta. As curvas obtidas para as demais velocidades de filtração apresentaram comportamentos semelhantes e são apresentadas no Apêndice B.

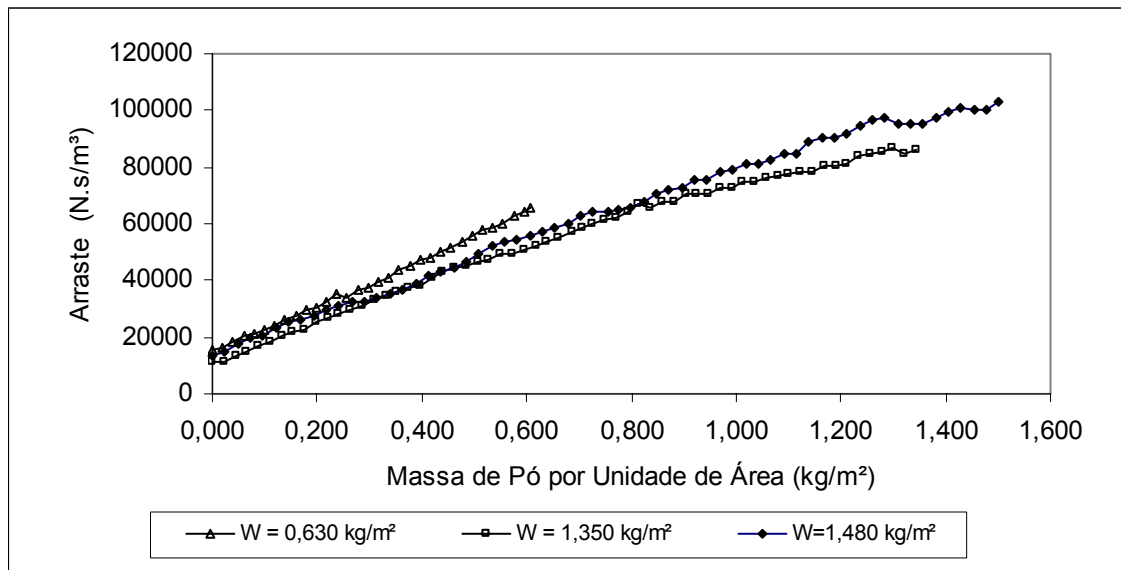


Figura 4.9 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 4,5 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)

Outra constatação importante é que na comparação dos resultados obtidos para cada tecido, apresentados na Tabela 4.1, para cada velocidade de filtração em particular, observa-se que o arraste inicial do tecido (S_0), obtido pela divisão da queda de pressão inicial de filtração pela velocidade de filtração e indicado na Figura 2.10, foi sempre bem maior para o algodão do que para o polipropileno, como por exemplo para a velocidade de 6,0 cm/s têm-se arraste inicial médio para o polipropileno de 1.962 N.s/m³ e de 10.192 N.s/m³ para o algodão.

A Tabela 4.1 apresenta os arrastes iniciais médios dos tecidos obtidos em cada velocidade de filtração. Nessa tabela pode-se observar que o arraste inicial do tecido de algodão sempre foi maior do que para o tecido de polipropileno, qualquer que fosse a velocidade de filtração empregada, o que é conseqüência de maiores quedas de pressão iniciais de filtração para o algodão.

Tabela 4.1 – Arraste inicial (S_0) médio dos tecidos para as diferentes velocidades de filtração utilizadas

TECIDO	S_0 para $V_f=4,5$ cm/s (N.s/m ³)	S_0 para $V_f=6,0$ cm/s (N.s/m ³)	S_0 para $V_f=7,5$ cm/s (N.s/m ³)	S_0 para $V_f=9,0$ cm/s (N.s/m ³)
Algodão	13.225	10.192	10.071	7.249
Polipropileno	1.671	1.962	1.613	1.526

Após os procedimentos de filtração foram realizados os experimentos de remoção das tortas, cujos detalhes são discutidos no item a seguir.

4.4 Remoção

Inicialmente, com objetivo de comparação, foram realizados ensaios de remoção utilizando-se os mesmos valores de variáveis que foram empregados no trabalho realizado por Lucas (2000) em meio filtrante de poliéster não trançado, ou seja, velocidades de filtração de 6,0; 9,0 e 11,0 cm/s, quedas de pressão finais na filtração de 100; 150; 200 e 300 mmH₂O e velocidades de remoção de 0,7; 1,5; 3,0; 4,5 e 6,0 cm/s. Entretanto a combinação destes parâmetros não forneceu valores significativos de percentuais de massa removida da torta (inferiores a 50% de remoção), notadamente para o tecido de algodão, sugerindo que estas condições de filtração, aliadas às características do pó, não seriam viáveis em uma situação real de trabalho, o que fez com que os parâmetros inicialmente estabelecidos fossem redimensionados. Os dados obtidos nesses ensaios preliminares são apresentados no Apêndice C.

Com os resultados insatisfatórios alcançados inicialmente, buscou-se a utilização de velocidades de filtração menores, aumento na espessura de torta com o aumento das

quedas de pressão de filtração e aumento das velocidades de remoção para, com isso, obter-se percentuais de remoção maiores do que 50% na maioria dos experimentos.

Assim, com a utilização de velocidades de remoção mais altas, velocidades de filtração mais baixas e quedas de pressão final de filtração mais altas (para aumentar a espessura final da torta), procurou-se aumentar as frações de torta removidas nos experimentos, estabelecendo-se os seguintes parâmetros para a realização dos experimentos: velocidades de filtração de 4,5; 6,0; 7,5 e 9,0 cm/s, quedas de pressão finais na filtração de 300; 400 e 500 mm H₂O e velocidades de remoção de 1,5; 3,0; 9,0; 12,0; 15,0 e 18,0 cm/s. A vazão mássica de pó foi ajustada para 0,02 g/s, equivalente a 11% da rotação total do prato alimentador ou uma rotação a cada 1 minuto e 40 segundos.

A Tabela 4.2 apresenta os percentuais de torta removidas para cada combinação de tecido, queda de pressão de filtração e velocidade de filtração utilizadas.

Na Tabela 4.2 observa-se que, apesar das condições bastante favoráveis à remoção utilizadas, ainda assim nem todas as combinações de parâmetros apresentaram percentual de remoção superior a 50 %, notadamente em filtrações utilizando-se o tecido de algodão como filtro, o que se atribuiu a uma menor predisposição à limpeza apresentada por este tecido devido às suas características. Observa-se ainda que, como regra geral, os percentuais de remoção nos experimentos de polipropileno, foram sempre bem maiores que os observados para o tecido de algodão em qualquer combinação de queda de pressão e velocidade de filtração. Uma possível explicação para esta observação está no fato de que, segundo Billmeyer (1975), o algodão é uma fibra composta por 95 % de celulose que, com três grupos hidroxilas (OH) na estrutura química, tem possibilidade de formar diversas pontes de hidrogênio, que aumentam as

forças de Van der Waals entre partícula e tecido, o que não acontece com o polipropileno que é um polímero formado somente por átomos de carbono e hidrogênio, portanto sem possibilidade de formação de pontes de hidrogênio. Outra característica que contribui para o fato é que, conforme caracterizado em 4.1, as fibras de algodão são de diâmetro menor, achatadas e retorcidas, enquanto que as do polipropileno são de diâmetro maior, mais arredondadas e lisas, o que desfavorece a retenção das partículas de pó neste último tecido em comparação com o primeiro.

Tabela 4.2 – Percentuais de torta removida nos filtros de algodão e polipropileno para cada par de queda de pressão e velocidade de filtração

Queda de Pressão (mmH ₂ O)	Velocidade de Filtração (cm/s)	Percentual de Torta Removida (%)	
		Algodão	Polipropileno
300	4,5	36,02	92,12
300	6,0	34,93	69,22
300	7,5	26,51	62,05
300	9,0	21,25	38,87
400	4,5	59,07	96,45
400	6,0	52,88	80,56
400	7,5	27,63	71,96
400	9,0	20,25	58,01
500	4,5	75,51	97,68
500	6,0	53,95	93,86
500	7,5	27,38	89,95
500	9,0	27,13	77,70

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram, respectivamente para os tecidos de algodão e polipropileno, as variações de frações de torta removidas, nas mesmas condições de remoção, em função das velocidades de filtração em cada queda de pressão final de filtração utilizada. Observa-se nestas figuras o aumento das percentagens de torta

removidas com o aumento das quedas de pressão de filtração (ΔP) e diminuição das velocidades de filtração (V_f).

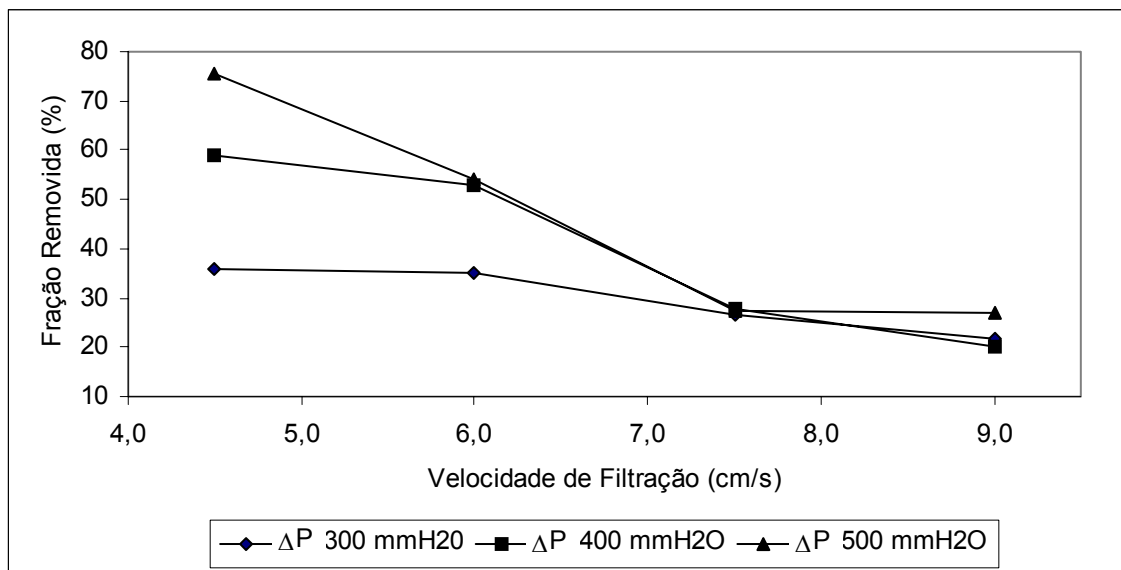


Figura 4.10 – Variação da fração de torta removida em função da velocidade de filtração para o filtro de algodão

Além disso, observa-se também nas Figuras 4.10 e 4.11 que para o filtro de algodão ocorreu uma certa estabilização nos valores de fração removida a partir da velocidade de filtração igual a 7,5 cm/s, enquanto que para o polipropileno esta estabilização não ocorreu, com as frações removidas continuando a diminuir com o aumento da velocidade de filtração para 9,0 cm/s, mas que poderia ter estabilizado a partir dessa velocidade, caso se tivesse empregado velocidades de filtração maiores.

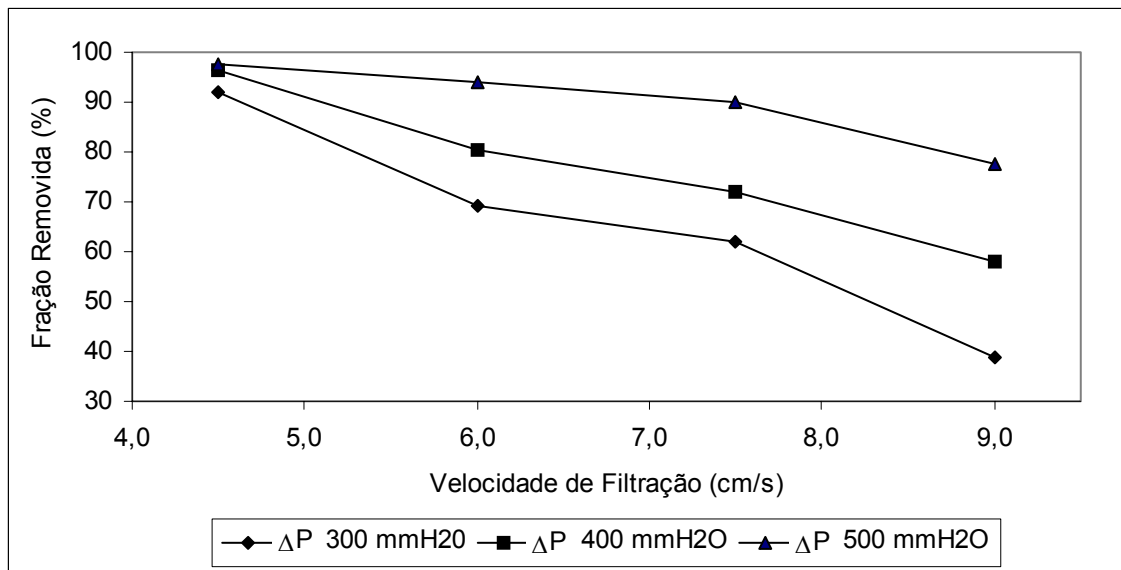


Figura 4.11 – Variação da fração de torta removida em função da velocidade de filtração para o filtro de polipropileno

A queda da fração removida com aumento da velocidade é explicada pelo fato de que, com a utilização de maiores velocidades de filtração, há um maior empacotamento da torta, diminuindo a distância entre as partículas o que, conforme estabelecido na equação (28), faz com que a tensão de ruptura do aglomerado aumente e dificulte sua remoção. Já a variação das frações removidas de torta a partir de velocidades de filtração de 7,5 cm/s decorre das características próprias de cada tecido, com o polipropileno, por ser mais poroso, facilitando a impregnação de partículas no seu corpo nas filtrações com velocidades mais altas, que ficam proporcionalmente mais difíceis de sair na operação de remoção, e por isso apresentou frações removidas de torta menores para as velocidades de filtração de 7,5 e 9,0 cm/s.

4.5 Força de Adesão

Para determinar a força de remoção da torta, utilizou-se o método descrito no item 2.8.1, que exigiu o cálculo das frações de massa retida na torta e o registro das quedas

de pressão de limpeza após cada velocidade de limpeza empregada. Os dados registrados nos experimentos e obtidos nestes cálculos são apresentados no Apêndice D. No Apêndice F são apresentados os gráficos de queda de pressão na limpeza (ΔP_c) e de velocidade de limpeza (V_c) em função da fração de massa retida na torta (γ), para cada velocidade de filtração empregada, que foram utilizados para construção dos gráficos de queda de pressão de limpeza (ΔP_c) em função da velocidade de limpeza (V_c).

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os gráficos de queda de pressão de limpeza (ΔP_{Tc}) em função da velocidade de limpeza (V_c), obtidos respectivamente para o polipropileno e para o algodão, para velocidade de filtração de 7,5 cm/s.

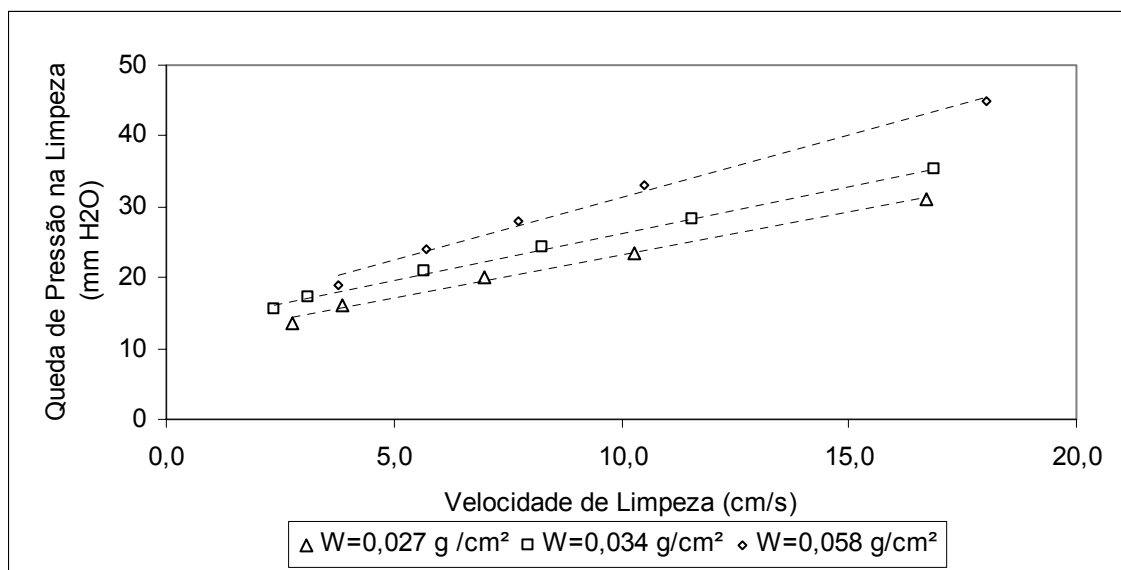


Fig 4.12 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o tecido de polipropileno e velocidade de filtração de 7,5 cm/s.

Como mostram as Figuras 4.12 e 4.13, os dados plotados foram submetidos a tratamento estatístico de regressão linear, que forneceu a equação da reta que melhor representa a variação estudada na forma $y = Ax + B$, em que o coeficiente angular A

representa a resistência específica do tecido (k_1) e o coeficiente linear B representa a queda de pressão na limpeza devido à torta (ΔP_{Cc}) ou, como buscou-se, a tensão de remoção da torta (σ_r), que é força de remoção da torta (F_C) dividida pela área de filtração (A). Calculou-se também os índices de correlação (R^2) dos dados plotados com as equações de reta obtidas, que representam o grau de aderência dos dados com a equação, i.e., quanto mais próximo de 1, mais linearmente os dados estão dispostos. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4.

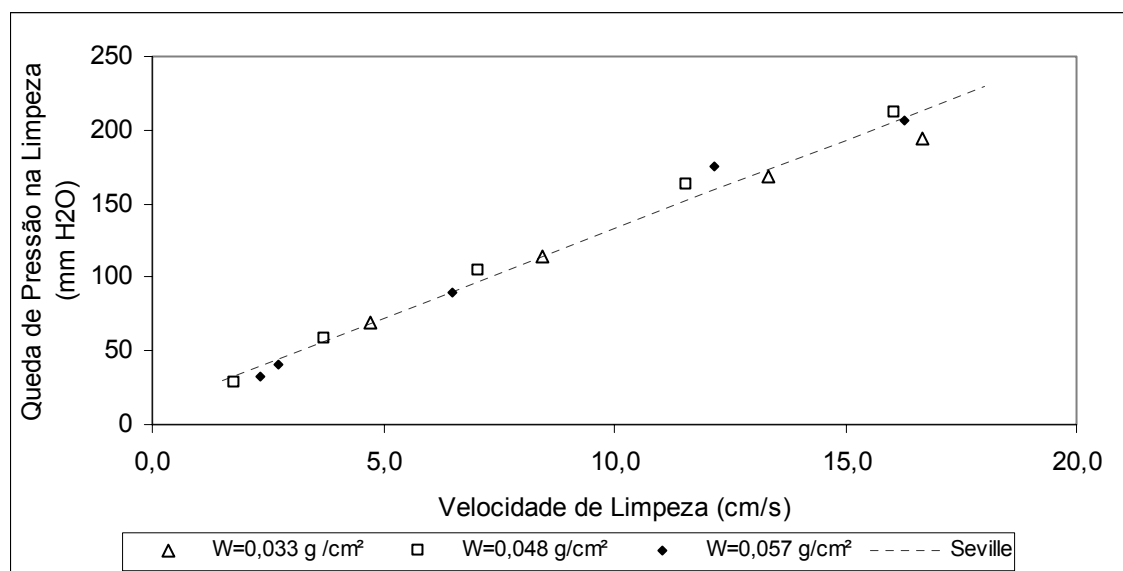


Fig 4.13 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o tecido de algodão e velocidade de filtração de 7,5 cm/s

A diferença fundamental observada nas Figuras 4.12 e 4.13 é que os resultados obtidos em todas as espessuras finais de torta (W) para o filtro de algodão se ajustam perfeitamente a uma reta geral com alto índice de correlação (R^2), como se observa na Tabela 4.3, em todas as velocidades de filtração utilizadas, com a tensão de remoção da torta sendo determinada pela interseção dessa curva com o eixo das ordenadas (coeficiente linear da reta), repetindo o comportamento de curva obtido nos trabalhos

realizados por Aguiar (1991) e Lucas (2000). Já para o filtro de polipropileno o resultado foi que os dados de cada experimento ajustaram-se individualmente perfeitamente a uma reta particular, também com alto índice de correlação R^2 , como mostra a Tabela 4.4, levando à obtenção de retas concorrentes que convergem para um ponto comum de interseção com o eixo das ordenadas, que determina a tensão de remoção da torta (coeficiente linear médio das retas), repetindo o comportamento de curva obtido nos trabalhos realizados por Seville et al. (1989) para diversos tipos de tecidos não trançados.

Tabela 4.3 – Valores de coeficiente de correlação (R^2), de resistência específica do meio filtrante (k_1), de tensão de remoção (σ_r), de força de adesão (F_c), porosidade média (ε) e distância entre partículas (a) para o filtro de algodão em cada velocidade de filtração (V_f) e espessura de torta (W).

V_f (cm/s)	ΔP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	R^2	k_1 (N.s/m ³)	σ_r (N/m ²)	F_c (N)	ε	a (10 ⁻⁹ x m)
4,50	300	630	0,9881	11275	45,91	1,04	0,62	2,95
	400	1350						
	500	1480						
6,00	300	520	0,9934	10050	52,88	1,20	0,60	3,06
	400	780						
	500	1000						
7,50	300	330	0,9826	11901	103,16	2,34	0,57	2,26
	400	480						
	500	570						
9,00	300	260	0,9795	13028	124,29	2,82	0,56	2,26
	400	380						
	500	480						

Estes comportamentos diferentes não devem estar relacionados ao tipo de estrutura do tecido, mas sim às propriedades das superfícies do tecido e da torta, visto que tecidos com estruturas diferentes como os feltros de poliéster não tecido, utilizados

nos trabalhos de Lucas (2000) e Aguiar (1991), apresentaram resultados semelhantes ao obtido para o tecido de algodão, que é um tecido tramado, i.e., uma única reta geral.

Assim parece claro que, dependendo das características superficiais do tecido e de sua interação com a torta, a tensão de remoção da torta pode ser obtida através de retas concorrentes em alguns casos e por uma reta geral em outros, quando aplicado o método proposto por Seville et al. (1989).

Os gráficos de queda de pressão de limpeza (ΔP_c) em função da velocidade de limpeza (V_c) obtidos para as demais velocidades de filtração apresentaram resultados semelhantes para ambos os tecidos e são apresentados no Apêndice E.

Tabela 4.4 – Valores de coeficiente de correlação (R^2), de resistência específica do meio filtrante (k_1), de tensão de remoção (σ_r), de força de adesão (F_c), porosidade (ϵ) e distância entre partículas (a) para o filtro de polipropileno em cada velocidade de filtração (V_f) e espessura de torta (W).

V_f (cm/s)	ΔP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	R^2	k_1 (N.s/m ³)	σ_r (N/m ²)	F_c (N)	ϵ	a (10 ⁻⁹ x m)
4,50	300	640	0,9925	1345	45,71	1,04	0,59	2,95
	400	980	0,9976	2191				
	500	1220	0,9997	2843				
6,00	300	350	0,9999	1747	108,99	2,47	0,53	2,13
	400	310	0,9796	2148				
	500	650	0,9776	1456				
7,50	300	270	0,9855	1098	121,55	2,76	0,54	2,15
	400	340	0,9971	1309				
	500	580	0,9917	1752				
9,00	300	160	0,9837	1146	125,37	2,85	0,51	2,25
	400	270	0,9946	1245				
	500	310	0,9977	2450				

Das Figuras 4.12 e 4.13 obteve-se também uma conclusão que, de uma certa forma, contrasta com os resultados de remoção discutidos em 4.4, i.e., embora os percentuais de remoção de torta tenham sido bem maiores para os filtros de polipropileno, em relação aos de algodão, para mesmas condições de filtração,

conforme se observa na Tabela 4.2, as tensões de remoção obtidas para esse filtro foram de igual magnitude a das tensões obtidas no algodão para as velocidades de filtração extremas (4,5 cm/s e 9,0 cm/s) e superiores nas velocidades de filtração intermediárias (6,0 cm/s e 7,5 cm/s), conforme se observa nas tabelas 4.3 e 4.4.

A explicação para maiores tensões de remoção com maiores frações removidas no tecido de polipropileno e a forma das curvas apresentadas na Figura 4.14 está no fato de que o tecido de polipropileno, por ser mais poroso, necessita de uma tensão de limpeza maior para remoção das partículas que se inseriram nos seus poros. Como a velocidade de filtração mais baixa (4,5 cm/s) não é suficiente para inserir profundamente as partículas nesses poros, a tensão de remoção se equivale à obtida para o algodão, aumentando com maior intensidade do que para o algodão nas velocidades intermediárias e atingindo seu limite na velocidade de filtração maior (9,0 cm/s), que é de igual magnitude à obtida para o algodão.

A Figura 4.14 mostra a variação da tensão de remoção (σ_r) em função da velocidade de filtração (V_f) para ambos os tecidos. Nessa figura se observa que as tensões de remoção se equivalem para os tecidos de algodão e polipropileno na primeira e última velocidade de filtração, sendo que para o tecido de polipropileno, a tensão de remoção aumenta drasticamente a partir da segunda velocidade, estabilizando-se a partir desta, sendo que isso só acontece para o tecido de algodão a partir da terceira velocidade, mas de maneira menos drástica.

Comparando-se as curvas da Figura 4.14 com as apresentadas nas Figuras 4.10 e 4.11, conclui-se que para ambos os tecidos as frações de tortas removidas decresceram com o aumento das tensões de remoção estimadas, i.e., quanto maior a velocidade de

filtração menor a fração de torta removida e maior a tensão necessária para a remoção, embora cada tecido tenha apresentado seu perfil particular de curva.

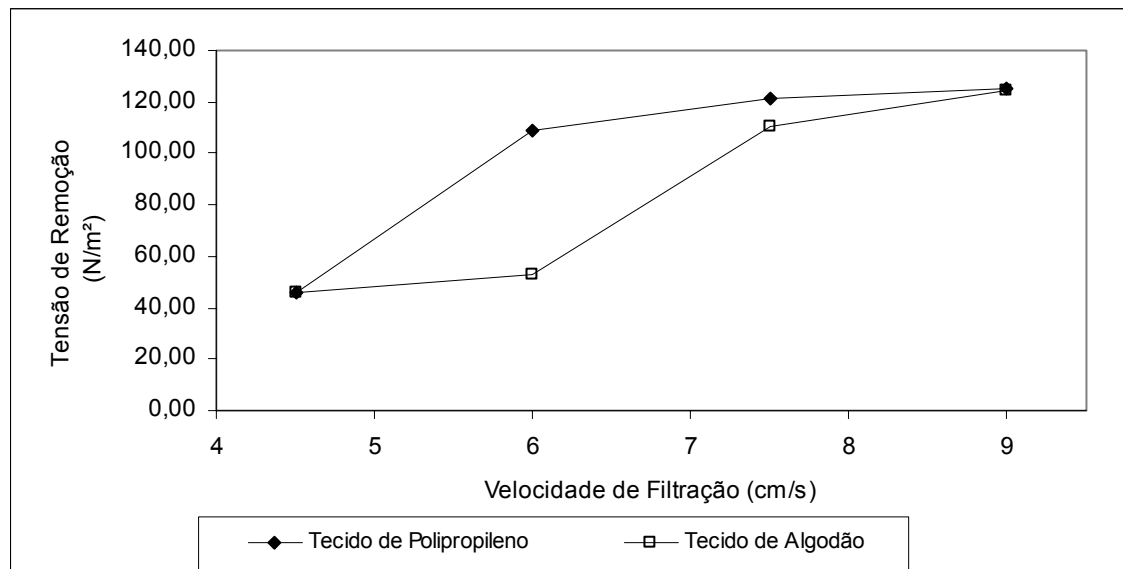


Figura 4.14 – Tensão de remoção em função da velocidade de filtração para os tecidos de algodão e polipropileno

A Figura 4.15 apresenta as curvas resultantes de tratamento estatístico de regressão dos mesmos dados utilizados para a construção da Figura 4.14.

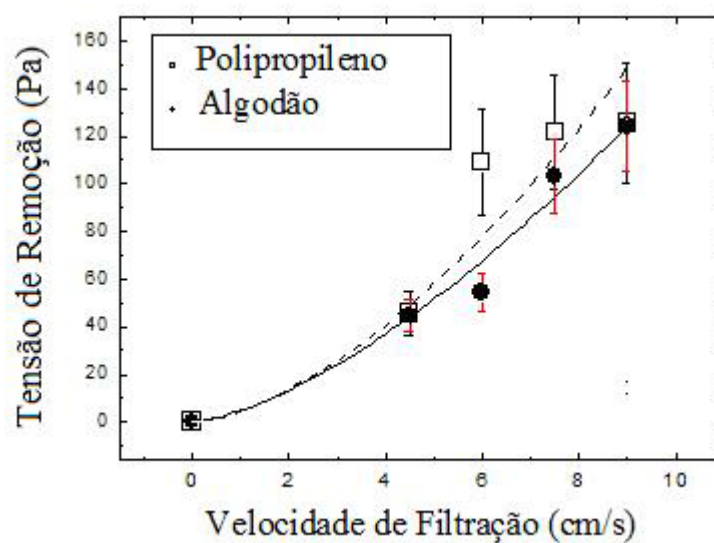


Figura 4.15 – Curvas de tensão de remoção em função da velocidade de filtração para os tecidos de polipropileno e algodão

As equações (36) e (37) mostram as relações de variação, obtidas no tratamento estatístico dos dados, da tensão de remoção (σ_r), dada em Pa, em função da velocidade de filtração (V_f), dada em cm/s, respectivamente para os tecidos de polipropileno e de algodão, sendo que para o polipropileno o erro de ajuste da curva foi de 20% e para o algodão foi de 15%. Observa-se que estas equações têm a mesma forma e que o termo exponencial permanece constante para ambos os tecidos, variando-se apenas o fator de multiplicação, que reflete a taxa de aumento da tensão de remoção em função da velocidade de filtração, que é maior para o polipropileno, i.e., a tensão de remoção no polipropileno cresce mais rapidamente com o aumento da velocidade do que no algodão.

$$\sigma_r = 5,4 \times V_f^{1,5} \quad (36)$$

$$\sigma_r = 4,7 \times V_f^{1,5} \quad (37)$$

Utilizando-se a correlação de Ergun, equação (26), calculou-se os valores de porosidade média de torta para cada tecido e velocidade de filtração empregada. Os valores obtidos são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4 e na Figura 4.16, que mostra o gráfico da variação da porosidade média da torta (ε) em função da velocidade de filtração (V_f) para os tecidos de polipropileno e algodão.

Observa-se na Figura 4.16 e nas Tabelas 4.3 e 4.4, que os valores de porosidade obtidos situam-se na faixa de 0,56 a 0,62 para o algodão e de 0,51 a 0,59 para o polipropileno e que diminuem com o aumento da velocidade de filtração. Estes

resultados são coerentes com os obtidos por Lucas (2000) para o mesmo pó, que situaram na faixa de 0,55 a 0,67 e também decresceram com o aumento da velocidade de filtração.

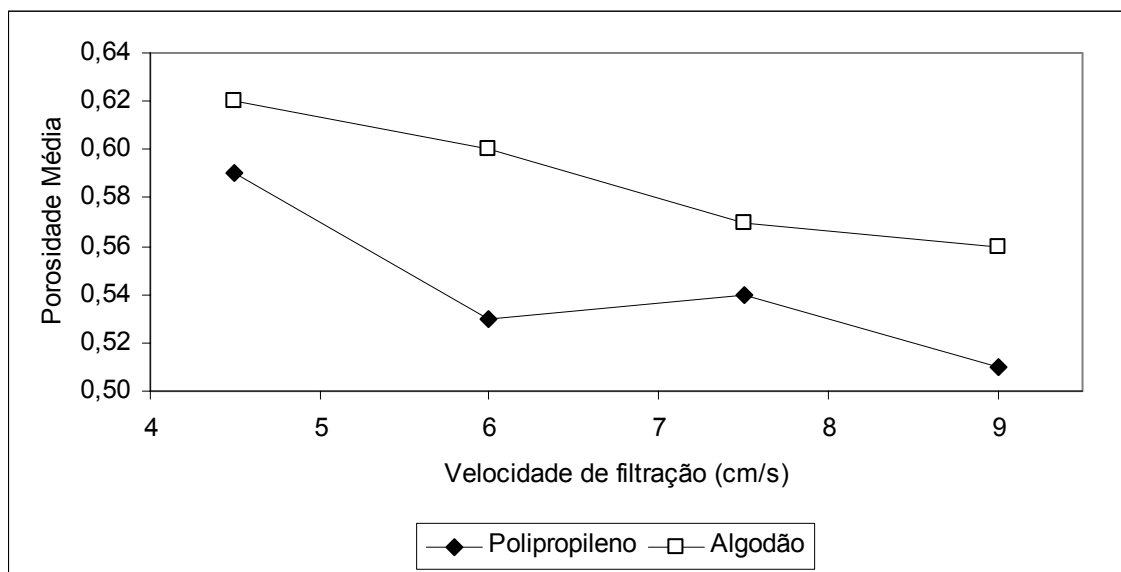


Figura 4.16 - Porosidade média da torta em função da velocidade de filtração para os tecidos de algodão e polipropileno

4.6 Patchy Cleaning

Durante a realização dos experimentos, observou-se a ocorrência do fenômeno conhecido como “patchy cleaning” (limpeza aos pedaços) nos processos de limpeza de ambos os tecidos estudados e que o diâmetro médio das placas removidas variava de experimento para experimento. Procurou-se então registrar essa variação de uma forma qualitativa, classificando-se qualitativamente as placas removidas, em função de seu

diâmetro, como pequenas (P), médias (M), grandes (G) e muito grandes (MG), como ilustrado na Figura 4.17.

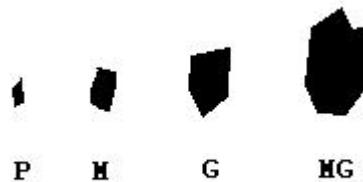


Figura 4.17 – Tamanho das placas de “patchy cleaning”

Para que os dados pudessem ser plotados em gráficos as placas pequenas receberam o número 1, as médias o 2, as grandes o 3 e as muito grandes o 4, sendo que a correlação destes valores foi analisada em função de todos os parâmetros obtidos nos experimentos, encontrando-se uma correlação direta entre a classe das placas e a porcentagem de torta removida em cada experimento para ambos os tipos de tecidos utilizados, sendo estas variações apresentadas nas Figuras 4.18 e 4.19.

Observa-se nas Figuras 4.18 e 4.19 que para ambos os tecidos houve uma tendência de aumento das placas removidas com o aumento da fração removida de torta, sendo que para o polipropileno as placas muito grandes ocorreram em frações removidas a partir de 94% enquanto que para o algodão essas placas ocorreram em frações removidas a partir de 59%, havendo também maior incidência de placas pequenas para o tecido de algodão em relação ao polipropileno, que apresentou esse tipo de placa somente em um experimento, o que é consequência da menor remoção de torta observada para o tecido de algodão.

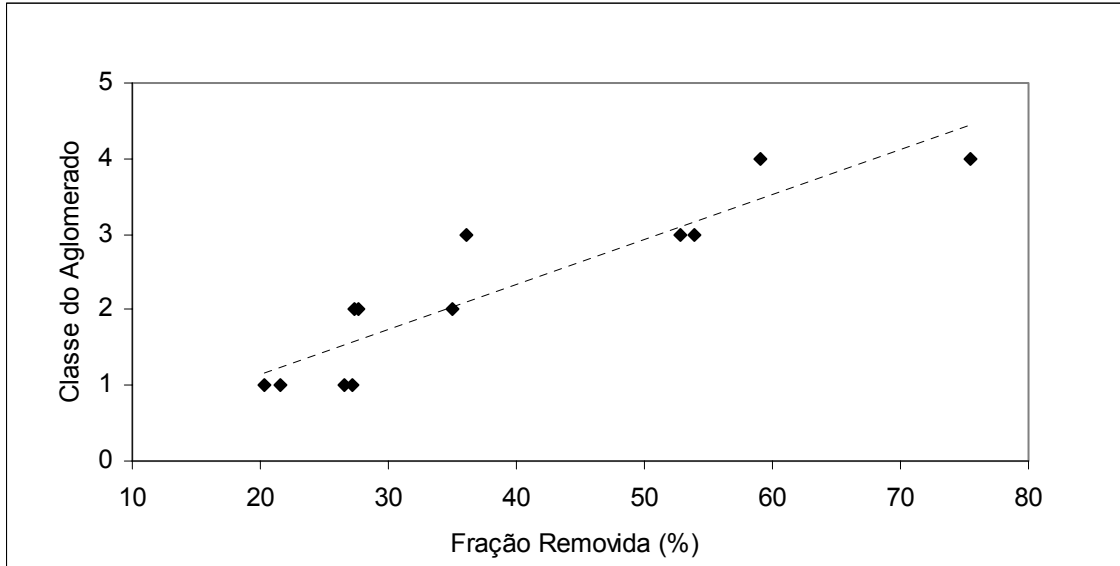


Figura 4.18 – Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da fração de torta removida para o filtro de algodão

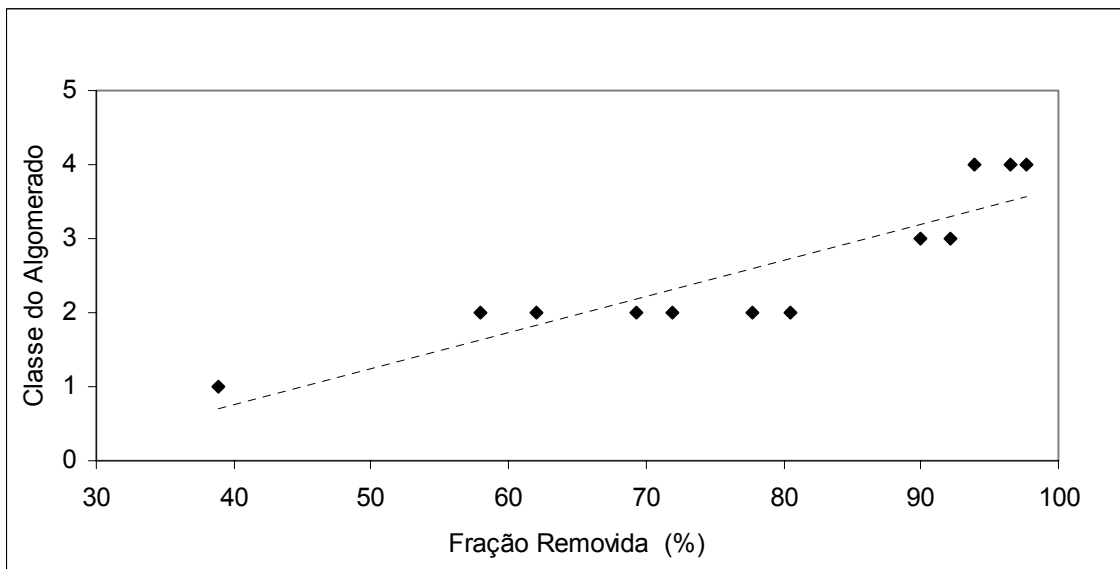


Figura 4.19 – Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da fração de torta removida para o filtro de polipropileno

Nas Figuras 4.20 e 4.21 apresentam-se as variações das classes de aglomerado em função da massa de pó depositada por unidade de área respectivamente para os tecidos de algodão e polipropileno.

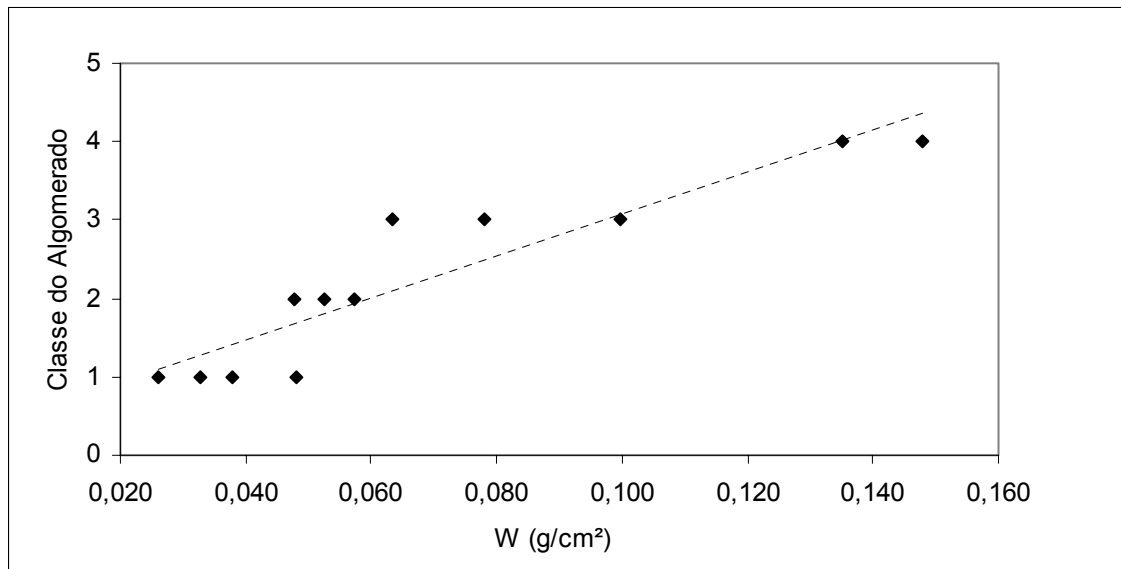


Figura 4.20 - Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da massa de pó depositada por unidade de área para o filtro de algodão

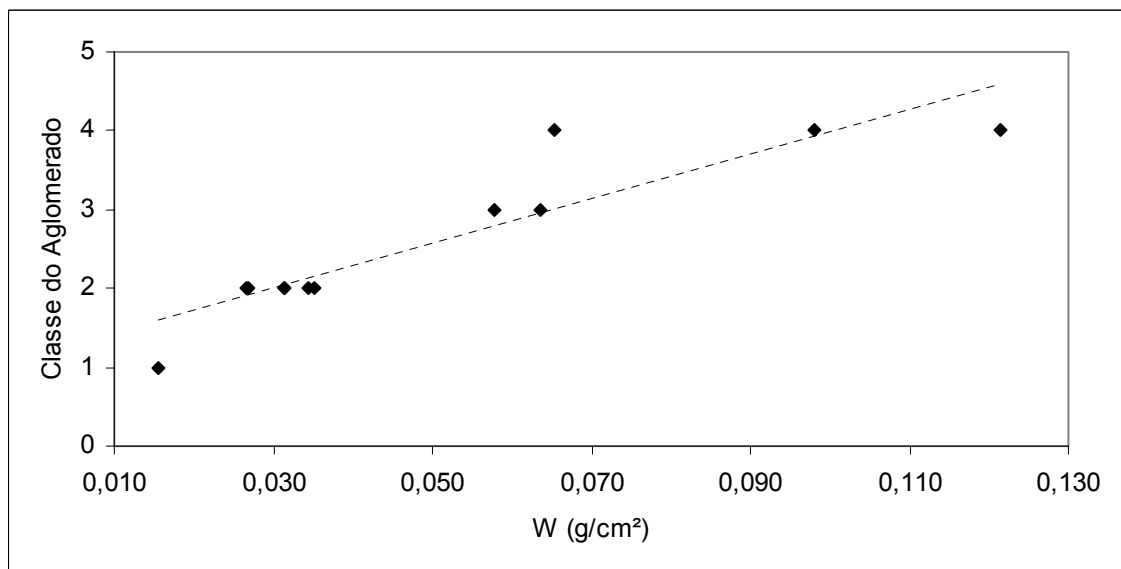


Figura 4.21 - Variação da classe do aglomerado de “patchy cleaning” em função da massa de pó depositada por unidade de área para o filtro de polipropileno

Nas Figuras 4.20 e 4.21 observa-se, para ambos os tecidos, uma tendência de aumento da classe do aglomerado com o aumento da massa de pó depositada por unidade de área. Essas constatações vêm a confirmar as evidências citadas por Koch et al. (1996), de que o diâmetro das placas removidas aumenta com a massa de pó depositada por unidade de área.

Os dados que geraram as Figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21 são apresentados nas Tabelas F.1 e F.2 do Apêndice F.

4.7 Considerações Finais

Considerando-se que valores significativos de frações removidas de torta só foram conseguidos com quedas de pressão de filtração superiores a 200 mmH₂O para ambos os tecidos, tem-se uma indicação de que a utilização dos tecidos estudados como meios filtrantes em filtros de manga pode não ser economicamente viável para a limpeza de gases com dispersão de concentrado fosfático de Patos de Minas, com partículas de diâmetro médio em torno de 4,55 µm, em uma situação real de trabalho. Entretanto, o tecido de polipropileno mostrou-se como um meio filtrante de maior facilidade de limpeza do que o algodão, por liberar maiores frações de tortas nos procedimentos de limpeza, o que o caracteriza como um meio filtrante mais adequado do que o algodão na filtração da dispersão de pó empregada.

5 CONCLUSÕES

Considerando-se o propósito deste trabalho e os resultados obtidos, pode-se concluir que :

- O tecido de algodão satura-se mais rapidamente do que o tecido de polipropileno nos ciclos de filtração e limpeza por ser um tecido mais fechado e apresentou um arraste inicial no primeiro ciclo de limpeza maior do que o do polipropileno, sendo que os arrastes observados dos tecidos nos ciclos iniciais e de saturação dos tecidos se igualaram na região de formação homogênea da torta (linear)
- As curvas de arraste apresentaram mesmas inclinações nas regiões de formação homogênea das tortas em cada velocidade de filtração para cada tipo de tecido estudado. As curvas de arraste para o algodão tenderam a se conformarem a uma linha reta e as do polipropileno a uma curva com concavidade para baixo
- O polipropileno apresentou maior fração de torta removida do que o algodão nos experimentos de remoção da torta por fluxo de ar reverso. A fração de torta removida diminuiu para ambos os tecidos com o aumento da velocidade de filtração, tendendo entretanto a se estabilizar a partir da velocidade de filtração de 7,5 cm/s para o algodão

- O polipropileno apresentou curvas concorrentes convergindo para um mesmo ponto para cada espessura de torta nos gráficos de queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para cada velocidade de filtração, enquanto que o algodão apresentou uma única curva para todas as espessuras de torta em cada velocidade de filtração.
- Os valores médios de tensão de remoção da torta estimados para o polipropileno foram maiores em cada velocidade de filtração do que os estimados para o algodão, porém se aproximando destes nas velocidades de filtração de 4,5 cm/s e 9,0 cm/s.
- A classe do aglomerado das placas de “patchy cleaning” aumentou com o aumento da fração removida de torta.
- O tecido de polipropileno mostrou-se mais adequado do que o algodão na filtração da dispersão de pó empregada, por permitir remoção de maiores frações de torta nos processos de limpeza.

6 SUGESTÕES

Para se aprofundar o conhecimento da aplicação dos filtros de tecido nas filtrações gás-sólido e do processo de remoção por fluxo de ar reverso, apresenta-se as seguintes sugestões:

- utilizar outros tecidos e materiais pulverulentos para estudo das forças de adesão;
- variar a granulometria do material pulverulento utilizado e
- fazer um estudo quantitativo da variação do diâmetro das placas de torta removidas em função da fração de torta removida e da massa de pó depositada por unidade de área, para equacionar o fenômeno, o que pode ajudar no encontro de condições menos drásticas de limpeza, que possam aumentar a vida útil dos tecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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

AGUIAR, M.L. ; COURY, J.R. Determinação da força de adesão entre partículas aglomeradas. In: XXI ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, Ouro Preto, MG, 1993, **Anais do XXI ENEMP**, Belo Horizonte, MG, 1994, v. 3, p. 793-802.

BAKER, J.F.; No binder required to create composite media. **Filtration and Separation**, v. 38, i. 3,p. 26-28, 2001.

BARNETT, T. Improving the performance of fabric filter dry dust collection equipment. **Filtration and Separation**. v.37, i.2, p. 28-32, 2000.

BILLINGS, C.E. & WILDER, J. **Handbook of fabric filter**. Springfield, EUA, NAPCA Publication PB-200 648, National Technical Information Service, 1970.

BILLMEYER, F.W. **Ciência de los polímeros**. 2 Ed. Barcelona, Espana,Editorial Reverté S.A., 1975. p. 447-448.

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

CAVASSENO, V. **Industrial air pollution engineering**. U.S.A., McGraw-Hill, 1980.

COURY, J.R. ; AGUIAR, M.L. Cake formation in fabric filtration of gases. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 35, p. 3673, 1996.

COURY, J.R. ; AGUIAR, M.L. Rupture of dry agglomerates. **Powder Technology** , v. 85 , n. 2, p. 37-43, 1995.

CROSS, J.A.; CETRONIO, A. Electrostatic forces and adhesion of particles, In : CONFERENCE ON DEPOSITION AND FILTRATION OF PARTICLES FROM GASES E LIQUIDS, Soc. Chem. Ind., 1978, Loughborough, UK.

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

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

DENNIS, R. ; DIRGO, J.A. Compaction of laboratory and field derived K2 values for dust collected on fabric filters. **Filtration and Separation**, v. 18, p. 394, 1981.

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

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

HAMAKER, H.C. The London-Van der Waals attraction between spherical particles. **Physica IV**, v.10, p. 1058, 1937.

KENDALL, K. Agglomerate strength. **Powder Metallurgy**. v. 31, f. 1, p. 28-31, 1988.

KOCH, D.; SEVILLE, J. ; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. **Powder Technology**, v. 86, n. 1, p. 21-29, 1996.

LEITH, D. ; ALLEN, R.W.K. Dust Filtration by Fabric Filters. **Progress in Filtration and Separation**, v. 4, p.1-55, 1986.

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

LYDON, R.P. New composite filter media. **Filtration and Separation**, v.37, i.5, pag. 26-28, june, 2000.

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

MATTESON, M.J.; ORR, C. **Filtration: Principles and Practices**. 2 Edition. New York, USA: Marcel Dekker Inc., 1986. v. 27 (Chemical Industries).

MORRIS, K.; ALLEN,R.W.K.; CLIFT, R. Adhesion of cakes to filter media. **Filtration and Separation**, v. 24, p.41-45, 1987.

NEGRINI, V.S.; MARTINS, J.C.; COURY, J.R. E AGUIAR, M.L. Determinação da porosidade de tortas de filtração de gases em função da velocidade superficial de filtração. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, São João Del-Rei, MG, 2000 , **Anais do XXIII ENEMP**, Teresópolis, RJ, 2001, p. 191-197.

PERRY, R.H. ; GREEN, D.W. **Perry's chemical engineering handbook**. 6^a ed., New York, McGraw-Hill, 1984.

RUDNICK, S.N. **Fundamental factors governing specific resistance of filter dust cakes**. 1978. S.D. Thesis - Harvard School of Publish Health, Boston, MA.

RUMPF, H. The strength of granules and agglomerates. In: Agglomeration, 1962, Philadelphia, PA. Proceedings of First International Symposium on Agglomeration. New York, USA and London, UK: WA Knepper, 1962. P. 379-418.

SANCHEZ, J.R. et al.; Comparative study of different fabrics in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes. **Filtration and Separation**, v.34, i.6, p. 593-598, 1997.

SCHMIDT, E. ; LOFFLER, F. Preparation of dust cakes for microscopic examination. **Powder Technology**, v. 60, n. 2, p. 173-177, 1990.

SCHUBERT, H. Principles of agglomeration. **International Chemical Engineering**, v. 21, n. 3, p.363-371, 1981.

SEVILLE, J.P.K.; CHEUNG, W. ; CLIFT, R. A patchy cleaning interpretation of dust cake release form non-woven fabrics. **Filtration and Separation**, v. 26, p.187-190, 1989.

SIEVERT, J. ; LOEFFLER, F. Dust cake release from non-woven fabrics. **Filtration and Separation**, v. 24, p.424-427, 1987.

SILVA, C.R.N. et al. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. **Powder Technology**, v. 101, n. 2, p.165-172, 1999.

SILVA NETO, O.G. **Estudo da porosidade de tortas em filtros de manga operando na filtração de gases**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

VISSER, J. Colloid and other forces in particle adhesion and particle removal (a review). In : CONFERENCE ON DEPOSITION AND FILTRATION OF PARTICLES FROM GASES AND LIQUIDS, Soc. Chem. Ind., 1978, Loughborough, UK.

ZIMON, A.D. **Adhesion of dust and powders.** 1^a Ed., New York, Plenum Press, 1969.

APÊNDICE A - DADOS DOS CICLOS DE LIMPEZA

Tabela A.1 - Dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

1º Ciclo			2º Ciclo			3º Ciclo		
Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)	Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)	Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)
0	11	108	0	20	196	0	22	216
100	79	775	100	125	1226	100	128	1256
200	139	1364	200	189	1854	200	178	1746
300	188	1844	300	237	2325	300	214	2099
400	229	2246	400	273	2678	400	246	2413
500	263	2580	500	309	3031	500	275	2698
600	293	2874	600	338	3316	600	298	2923
700	333	3267	700	363	3561	700	319	3129
800	362	3551	800	386	3787	800	344	3375
900	387	3796	875	404	3963	900	358	3512
980	402	3944				1000	372	3649
						1100	388	3806
						1190	402	3944
4º Ciclo			5º Ciclo			6º Ciclo		
Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)	Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)	Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)
0	47	461	0	52	510	0	51	500
100	119	1167	100	145	1422	100	143	1403
200	156	1530	200	198	1942	200	191	1874
300	190	1864	300	247	2423	300	230	2256
400	220	2158	400	283	2776	400	260	2551
500	243	2384	500	308	3021	500	293	2874
600	263	2580	600	336	3296	600	318	3120
700	281	2757	700	359	3522	700	347	3404
800	291	2855	800	385	3777	800	364	3571
900	310	3041	875	402	3944	900	387	3796
1000	327	3208				995	402	3944
1100	339	3326						
1200	356	3492						
1300	370	3630						
1400	386	3787						
1500	393	3855						
1550	408	4002						

Tabela A.2 - Dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de algodão

1° Ciclo			2° Ciclo			3° Ciclo		
Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)	Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)	Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)
0	67	657	0	95	932	0	107	1050
100	102	1001	100	152	1491	100	189	1854
200	127	1246	200	197	1933	200	231	2266
300	153	1501	300	208	2040	300	260	2551
400	179	1756	400	256	2511	400	293	2874
500	206	2021	500	284	2786	500	319	3129
600	233	2286	600	312	3061	600	346	3394
700	259	2541	700	338	3316	700	370	3630
800	287	2815	800	353	3463	800	378	3708
900	314	3080	900	384	3767	900	394	3865
1000	327	3208	1000	399	3914	915	402	3944
1000	327	3208	1060	401	3934			
1100	342	3355						
1200	377	3698						
1300	399	3914						
1305	401	3934						
4° Ciclo								
Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	DP (N/m ²)						
0	85	834						
100	165	1619						
200	208	2040						
300	247	2423						
400	274	2688						
500	299	2933						
600	333	3267						
700	353	3463						
800	375	3679						
900	391	3836						
975	402	3944						

Tabela A.3 – Outros dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de algodão

Ciclo	Peso Torta (g)	W (g/cm ²)	Q real (g/s)
1°	19,24	0,085	0,015
2°	14,35	0,063	0,014
3°	12,93	0,057	0,014
4°	12,91	0,057	0,013

Tabela A.4 – Outros dados dos ciclos de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Ciclo	P.Torta (g)	W (g/cm ²)	Q real (g/s)
1°	19,96	0,09	0,020
2°	15,33	0,07	0,018
3°	12,7	0,06	0,011
4°	16,27	0,07	0,010
5°	11,24	0,05	0,013
6°	11,05	0,05	0,011

Tabela A.5 – Dados da curva de filtração do 1° ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ³)
0	11	0,00	1,9E+05
50	39	0,04	6,4E+05
100	79	0,09	1,3E+06
150	111	0,13	1,8E+06
200	139	0,18	2,3E+06
250	165	0,22	2,7E+06
300	188	0,27	3,1E+06
350	209	0,31	3,4E+06
400	229	0,36	3,7E+06
450	247	0,40	4,0E+06
500	263	0,45	4,3E+06
550	277	0,49	4,5E+06
600	293	0,54	4,8E+06
650	320	0,58	5,2E+06
700	333	0,63	5,4E+06
750	340	0,67	5,6E+06
800	362	0,72	5,9E+06
850	373	0,76	6,1E+06
900	387	0,81	6,3E+06
950	395	0,85	6,5E+06
980	402	0,88	6,6E+06

Tabela A.6 – Dados da curva de filtração do 2º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ³)
0	20	0,00	3,3E+05
50	93	0,04	1,5E+06
100	125	0,08	2,0E+06
150	161	0,12	2,6E+06
200	189	0,15	3,1E+06
250	213	0,19	3,5E+06
300	237	0,23	3,9E+06
350	255	0,27	4,2E+06
400	273	0,31	4,5E+06
450	286	0,35	4,7E+06
500	309	0,39	5,1E+06
550	326	0,42	5,3E+06
600	338	0,46	5,5E+06
650	351	0,50	5,7E+06
700	363	0,54	5,9E+06
750	372	0,58	6,1E+06
800	386	0,62	6,3E+06
850	397	0,66	6,5E+06
875	404	0,68	6,6E+06

Tabela A.7 – Dados da curva de filtração do 3º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ³)
0	22	0,00	3,5E+05
50	101	0,02	1,7E+06
100	128	0,05	2,1E+06
150	152	0,07	2,5E+06
200	178	0,09	2,9E+06
250	198	0,12	3,2E+06
300	214	0,14	3,5E+06
350	229	0,16	3,7E+06
400	246	0,19	4,0E+06
450	258	0,21	4,2E+06
500	275	0,24	4,5E+06
550	282	0,26	4,6E+06
600	298	0,28	4,9E+06
650	309	0,31	5,1E+06
700	319	0,33	5,2E+06
750	330	0,35	5,4E+06
800	344	0,38	5,6E+06
850	350	0,40	5,7E+06
900	358	0,42	5,9E+06
950	368	0,45	6,0E+06
1000	372	0,47	6,1E+06
1050	384	0,49	6,3E+06
1100	388	0,52	6,3E+06
1150	394	0,54	6,4E+06
1190	402	0,56	6,6E+06

Tabela A.8 – Dados da curva de filtração do 4º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ²)
0	47	0,00	7,7E+05
50	93	0,02	1,5E+06
100	119	0,05	2,0E+06
150	144	0,07	2,4E+06
200	156	0,09	2,6E+06
250	178	0,12	2,9E+06
300	190	0,14	3,1E+06
350	205	0,16	3,4E+06
400	220	0,19	3,6E+06
450	230	0,21	3,8E+06
500	243	0,23	4,0E+06
550	255	0,25	4,2E+06
600	263	0,28	4,3E+06
650	267	0,30	4,4E+06
700	281	0,32	4,6E+06
750	286	0,35	4,7E+06
800	291	0,37	4,8E+06
850	300	0,39	4,9E+06
900	310	0,42	5,1E+06
950	313	0,44	5,1E+06
1000	327	0,46	5,4E+06
1050	335	0,49	5,5E+06
1100	339	0,51	5,5E+06
1150	344	0,53	5,6E+06
1200	356	0,56	5,8E+06
1250	362	0,58	5,9E+06
1300	370	0,60	6,1E+06
1350	378	0,62	6,2E+06
1400	386	0,65	6,3E+06
1450	394	0,67	6,4E+06
1500	393	0,69	6,4E+06
1550	408	0,72	6,7E+06

Tabela A.9 – Dados da curva de filtração do 5º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ²)
0	52	0,00	8,51E+05
50	110	0,03	1,80E+06
100	145	0,06	2,37E+06
150	172	0,09	2,81E+06
200	198	0,11	3,24E+06
250	224	0,14	3,66E+06
300	247	0,17	4,04E+06
350	271	0,20	4,43E+06
400	283	0,23	4,63E+06
450	298	0,26	4,88E+06
500	308	0,29	5,04E+06
550	320	0,31	5,23E+06
600	336	0,34	5,49E+06
650	343	0,37	5,60E+06
700	359	0,40	5,87E+06
750	371	0,43	6,07E+06
800	385	0,46	6,30E+06
850	390	0,49	6,37E+06
875	402	0,50	6,57E+06

Tabela A.10 – Dados da curva de filtração do 6º ciclo de filtração e limpeza do tecido de polipropileno

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ³)
0	51	0,00	8,3E+05
50	102	0,02	1,7E+06
100	143	0,05	2,3E+06
150	170	0,07	2,8E+06
200	191	0,10	3,1E+06
250	208	0,12	3,4E+06
300	230	0,14	3,8E+06
350	250	0,17	4,1E+06
400	260	0,19	4,3E+06
450	276	0,22	4,5E+06
500	293	0,24	4,8E+06
550	308	0,27	5,0E+06
600	318	0,29	5,2E+06
650	332	0,31	5,4E+06
700	347	0,34	5,7E+06
750	353	0,36	5,8E+06
800	364	0,39	6,0E+06
850	378	0,41	6,2E+06
900	387	0,43	6,3E+06
950	390	0,46	6,4E+06
995	402	0,48	6,6E+06

Tabela A.11 – Dados da curva de filtração do 1º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ³)
0	67	0,00	1,1E+06
50	86	0,03	1,4E+06
100	102	0,06	1,7E+06
150	111	0,10	1,8E+06
200	127	0,13	2,1E+06
250	139	0,16	2,3E+06
300	153	0,19	2,5E+06
350	163	0,23	2,7E+06
400	179	0,26	2,9E+06
450	191	0,29	3,1E+06
500	206	0,32	3,4E+06
550	222	0,36	3,6E+06
600	233	0,39	3,8E+06
650	248	0,42	4,1E+06
700	259	0,45	4,2E+06
750	272	0,49	4,4E+06
800	287	0,52	4,7E+06
850	298	0,55	4,9E+06
900	314	0,58	5,1E+06
950	317	0,62	5,2E+06
1000	327	0,65	5,4E+06
1050	330	0,68	5,4E+06
1100	342	0,71	5,6E+06
1150	359	0,75	5,9E+06
1200	377	0,78	6,2E+06
1250	389	0,81	6,4E+06
1300	399	0,84	6,5E+06
1305	401	0,85	6,6E+06

Tabela A.12 – Dados da curva de filtração do 2º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste N.s/m ³
0	95	0,00	1,6E+06
50	134	0,03	2,2E+06
100	152	0,06	2,5E+06
150	177	0,09	2,9E+06
200	197	0,12	3,2E+06
250	206	0,15	3,4E+06
300	208	0,18	3,4E+06
350	234	0,21	3,8E+06
400	256	0,24	4,2E+06
450	273	0,27	4,5E+06
500	284	0,30	4,6E+06
550	302	0,33	4,9E+06
600	312	0,36	5,1E+06
650	324	0,39	5,3E+06
700	338	0,42	5,5E+06
750	342	0,45	5,6E+06
800	353	0,48	5,8E+06
850	375	0,51	6,1E+06
900	384	0,54	6,3E+06
950	386	0,57	6,3E+06
1000	399	0,60	6,5E+06
1060	401	0,63	6,6E+06

Tabela A.13 – Dados da curva de filtração do 3º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão

Tempo (s)	DP (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	Arraste (N.s/m ³)
0	107	0,00	1,7E+06
50	153	0,03	2,5E+06
100	189	0,06	3,1E+06
150	209	0,09	3,4E+06
200	231	0,12	3,8E+06
250	248	0,16	4,1E+06
300	260	0,19	4,2E+06
350	276	0,22	4,5E+06
400	293	0,25	4,8E+06
450	307	0,28	5,0E+06
500	319	0,31	5,2E+06
550	321	0,34	5,2E+06
600	346	0,37	5,7E+06
650	358	0,40	5,9E+06
700	370	0,44	6,0E+06
750	370	0,47	6,1E+06
800	378	0,50	6,2E+06
850	391	0,53	6,4E+06
900	394	0,56	6,4E+06
915	402	0,57	6,6E+06

Tabela A.14 – Dados da curva de filtração do 4º ciclo de filtração e limpeza do tecido de algodão

Tempo (s)	DP (mm H₂O)	W (kg/m²)	Arraste (N.s/m³)
0	85	0,00	1,4E+06
50	130	0,03	2,1E+06
100	165	0,06	2,7E+06
150	188	0,09	3,1E+06
200	208	0,12	3,4E+06
250	229	0,15	3,7E+06
300	247	0,17	4,0E+06
350	259	0,20	4,2E+06
400	274	0,23	4,5E+06
450	285	0,26	4,7E+06
500	299	0,29	4,9E+06
550	315	0,32	5,2E+06
600	333	0,35	5,4E+06
650	343	0,38	5,6E+06
700	353	0,41	5,8E+06
750	361	0,44	5,9E+06
800	375	0,47	6,1E+06
850	387	0,50	6,3E+06
900	391	0,52	6,4E+06
950	398	0,55	6,5E+06
975	402	0,57	6,6E+06

APÊNDICE B – Dados de Filtração e Arraste e Curvas de Arraste

Tabela B.1 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 0,640$ g/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	8	0,000	1.766
100	39	0,053	8.535
200	81	0,106	17.658
300	115	0,159	25.016
400	144	0,211	31.294
500	172	0,264	37.474
600	198	0,317	43.164
700	221	0,370	48.069
800	240	0,423	52.287
900	254	0,476	55.328
1000	269	0,529	58.762
1100	284	0,582	61.803
1195	300	0,640	65.433

Tabela B.2 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 0,980$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	8	0,000	1.766
100	59	0,053	12.753
200	101	0,106	22.073
300	130	0,159	28.351
400	151	0,211	32.864
500	181	0,264	39.338
600	206	0,317	44.930
700	225	0,370	49.050
800	243	0,423	52.974
900	264	0,476	57.585
1000	275	0,529	60.037
1100	292	0,582	63.667
1200	301	0,634	65.727
1300	316	0,687	68.866
1400	328	0,740	71.515
1500	330	0,788	71.907
1600	352	0,843	76.714
1700	359	0,904	78.284
1800	378	0,962	82.502
1900	387	0,980	84.268

Tabela B.3 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 1,220$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	7	0,000	1.570
100	114	0,048	24.819
200	168	0,097	36.591
300	202	0,145	43.949
400	222	0,194	48.461
500	241	0,242	52.582
600	263	0,291	57.487
700	280	0,339	61.116
800	308	0,388	67.297
900	325	0,436	70.828
1000	336	0,485	73.281
1100	352	0,533	76.812
1200	370	0,582	80.736
1300	384	0,630	83.679
1400	395	0,678	86.132
1500	411	0,727	89.565
1600	421	0,775	91.724
1700	429	0,824	93.587
1800	438	0,872	95.451
1900	445	0,921	97.021
2000	457	0,969	99.473
2100	465	1,018	101.337
2200	471	1,066	102.613
2300	480	1,115	104.673
2400	490	1,163	106.831
2500	494	1,212	107.714
2600	500	1,220	108.989

Tabela B.4 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,350$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	7	0,000	1.177
100	40	0,053	6.573
200	89	0,106	14.519
300	137	0,159	22.367
400	172	0,211	28.155
500	208	0,264	33.943
600	247	0,317	40.417
700	272	0,370	44.439
800	292	0,410	47.775

Tabela B.5 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,310$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	17	0,000	2.747
50	86	0,026	14.028
100	145	0,053	23.740
150	191	0,079	31.196
200	228	0,106	37.278
250	258	0,132	42.085
300	282	0,159	46.205
350	306	0,185	50.129
400	332	0,211	54.347
450	352	0,238	57.585
500	372	0,264	60.822
550	387	0,291	63.275
590	402	0,310	65.727

Tabela B.6 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,650$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	12	0,000	1.962
100	37	0,022	6.082
200	85	0,044	13.930
300	121	0,066	19.816
400	154	0,088	25.212
500	185	0,110	30.313
600	211	0,132	34.531
700	239	0,154	39.044
800	258	0,176	42.085
900	276	0,198	45.126
1000	298	0,220	48.658
1100	316	0,242	51.699
1200	329	0,264	53.759
1300	345	0,286	56.506
1400	361	0,308	59.056
1500	364	0,330	59.449
1600	377	0,352	61.607
1700	387	0,374	63.176
1800	395	0,397	64.648
1900	408	0,419	66.708
2000	424	0,441	69.357
2100	430	0,463	70.338
2200	440	0,485	72.005
2300	447	0,507	73.085
2400	454	0,529	74.262
2500	459	0,551	74.948
2600	466	0,573	76.126

Continuação da Tabela B.6

2700	481	0,595	78.676
2800	482	0,617	78.774
2900	478	0,639	78.088
2995	505	0,650	82.600

Tabela B.7 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,270$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	9	0,000	1.177
100	101	0,053	13.244
200	160	0,106	20.895
300	213	0,159	27.762
400	256	0,211	33.452
500	294	0,264	38.553
510	301	0,270	39.338

Tabela B.8 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,340$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	12	0,000	1.570
100	65	0,031	8.535
200	113	0,062	14.715
300	152	0,093	19.914
400	194	0,123	25.408
500	214	0,154	27.959
600	254	0,185	33.256
700	298	0,216	39.044
800	333	0,247	43.556
900	355	0,278	46.401
1000	387	0,308	50.620
1070	402	0,340	52.582

Tabela B.9 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,580$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	16	0,000	2.060
100	137	0,088	17.854
200	240	0,176	31.392
300	319	0,264	41.693
400	385	0,352	50.325
500	436	0,441	57.094
600	474	0,529	61.999
665	500	0,580	65.433

Tabela B.10 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 160$ g/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	8	0,000	883
50	31	0,024	3.434
100	101	0,048	10.987
150	161	0,073	17.560
200	213	0,097	23.250
250	254	0,121	27.664
300	288	0,145	31.392
320	301	0,160	32.864

Tabela B.11 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 270$ g/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	9	0,000	981
50	41	0,022	4.415
100	107	0,044	11.674
150	144	0,066	15.696
200	162	0,088	17.658
250	206	0,110	22.465
300	247	0,132	26.879
350	284	0,154	30.902
400	317	0,176	34.531
435	329	0,192	35.905
450	339	0,198	36.984
500	362	0,220	39.436
550	380	0,242	41.398
595	402	0,262	43.753

Tabela B.12 – Dados de filtração e arraste para o filtro de polipropileno para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,310$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	25	0,000	2.747
50	100	0,035	10.889
100	190	0,070	20.699
150	255	0,106	27.762
200	312	0,141	34.041
250	367	0,176	39.927
300	412	0,211	44.930
350	446	0,247	48.560
400	477	0,282	51.993
435	502	0,310	54.642

Tabela B.13 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 0,630$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	70	0,000	15.304
100	83	0,040	18.247
200	98	0,079	21.288
300	110	0,119	23.838
400	125	0,159	27.272
500	138	0,198	30.019
600	161	0,238	35.120
700	168	0,278	36.591
800	182	0,317	39.731
900	202	0,357	43.949
1000	216	0,397	47.088
1100	231	0,436	50.325
1200	245	0,476	53.465
1300	265	0,515	57.781
1400	274	0,555	59.841
1500	295	0,595	64.256
1530	301	0,630	65.629

Tabela B.14 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 1,350$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	52	0,000	11.380
100	61	0,044	13.244
200	77	0,088	16.775
300	93	0,132	20.209
400	104	0,176	22.661
500	124	0,220	27.076
600	135	0,264	29.430
700	152	0,308	33.060
800	165	0,352	35.905
900	176	0,397	38.455
1000	196	0,441	42.772
1100	209	0,485	45.518
1200	216	0,529	47.186
1300	228	0,573	49.737
1400	240	0,617	52.287
1500	254	0,661	55.328
1600	267	0,705	58.271
1700	282	0,749	61.607
1800	293	0,793	63.961
1900	301	0,837	65.629
2000	312	0,881	68.081

Continuação da Tabela B.14

2100	325	0,925	70.926
------	-----	-------	--------

2200	333	0,969	72.692
2300	343	1,013	74.850
2400	350	1,057	76.224
2500	355	1,101	77.303
2600	360	1,145	78.480
2700	370	1,190	80.638
2800	384	1,234	83.679
2900	390	1,278	85.053
3000	388	1,322	84.660
3100	396	1,350	86.328

Tabela B.15 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 4,5$ cm/s e $W = 1,480$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	60	0,000	13.047
100	81	0,048	17.658
200	95	0,097	20.797
300	115	0,145	25.212
400	127	0,194	27.664
500	143	0,242	31.196
600	150	0,291	32.667
700	160	0,339	35.022
800	178	0,388	38.848
900	197	0,436	43.066
1000	213	0,485	46.401
1100	238	0,533	51.895
1200	249	0,582	54.249
1300	263	0,630	57.487
1400	274	0,678	59.841
1500	295	0,727	64.452
1600	298	0,775	65.040
1700	312	0,824	68.081
1800	330	0,872	71.907
1900	346	0,921	75.439
2000	361	0,969	78.578
2100	371	1,018	80.933
2200	378	1,066	82.502
2300	388	1,115	84.660
2400	413	1,163	90.056
2500	420	1,212	91.625
2600	445	1,260	96.923
2700	438	1,308	95.451
2800	438	1,357	95.451
2900	457	1,405	99.473
3000	460	1,454	100.258
3100	492	1,480	103.201

Tabela B.16 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,520$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	51	0,000	8.339
100	98	0,048	16.045
200	125	0,097	20.477
300	151	0,145	24.643
400	172	0,194	28.100
500	195	0,242	31.912
600	212	0,291	34.660
700	229	0,339	37.408
800	247	0,388	40.422
900	258	0,436	42.195
1000	289	0,485	47.248
1050	300	0,520	49.020

Tabela B.17 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 0,780$ g/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	59	0,000	9.614
100	83	0,040	13.636
200	94	0,079	15.402
300	100	0,119	16.383
400	103	0,159	16.873
500	126	0,198	20.699
600	143	0,238	23.348
700	171	0,278	28.057
800	190	0,317	31.000
900	211	0,357	34.531
1000	232	0,397	37.867
1100	260	0,436	42.575
1200	273	0,476	44.636
1300	295	0,515	48.265
1400	324	0,555	52.876
1500	336	0,595	54.838
1600	351	0,634	57.487
1700	356	0,674	58.173
1800	381	0,714	62.294
1900	387	0,753	63.275
2000	398	0,780	62.980

Tabela B.18 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 6,0$ cm/s e $W = 1,000$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	77	0,000	12.557
100	86	0,062	14.126
200	112	0,123	18.345
300	144	0,185	23.446
400	171	0,247	27.959
500	202	0,308	32.962
600	223	0,370	36.493
700	263	0,432	43.066
800	286	0,493	46.794
900	312	0,555	51.012
1000	345	0,617	56.506
1100	368	0,678	60.233
1200	397	0,740	64.844
1300	414	0,802	67.591
1400	429	0,864	70.240
1500	471	0,925	77.009
1600	482	0,987	78.774
1660	506	1,000	82.796

Tabela B.19 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,330$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	52	0,000	6.769
50	101	0,024	13.244
100	118	0,048	15.402
150	136	0,073	17.756
200	143	0,097	18.737
250	163	0,121	21.288
300	184	0,145	24.133
350	199	0,170	25.997
400	221	0,194	28.940
450	251	0,218	32.864
500	269	0,242	35.218
550	281	0,267	36.788
600	290	0,291	37.965
650	298	0,315	39.044
655	305	0,330	39.894

Tabela B.20 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,480$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	95	0,000	12.459
100	128	0,053	16.775
200	161	0,106	21.092
300	195	0,159	25.506
400	227	0,211	29.724
500	248	0,264	32.471
600	281	0,317	36.689
700	316	0,370	41.300
800	342	0,423	44.636
900	396	0,480	51.797

Tabela B.21 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 7,5$ cm/s e $W = 0,570$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	84	0,000	10.987
100	126	0,062	16.481
200	170	0,123	22.269
300	214	0,185	28.057
400	263	0,247	34.433
500	308	0,308	40.319
600	360	0,370	47.088
700	402	0,432	52.582
800	438	0,493	57.290
900	474	0,555	61.999
955	507	0,570	66.414

Tabela B.22 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,260$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)	W (kg/m ²)	S (N.s/m ³)
0	66	0,000	7.151
50	130	0,037	14.183
100	162	0,075	17.611
150	191	0,112	20.802
200	221	0,150	24.111
250	239	0,187	26.062
300	275	0,225	30.021
340	303	0,260	33.035

Tabela B.23 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,380$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H₂O)	W (kg/m²)	S (N.s/m³)
0	77	0,000	8.392
50	144	0,044	15.720
100	174	0,088	18.970
150	203	0,132	22.161
200	233	0,176	25.352
250	268	0,220	29.194
300	299	0,264	32.621
350	327	0,308	35.694
400	370	0,352	40.304
440	405	0,380	44.145

Tabela B.24 – Dados de filtração e arraste para o filtro de algodão para $V_f = 9,0$ cm/s e $W = 0,480$ kg/m²

Tempo (s)	Queda de Pressão (mm H₂O)	W (kg/m²)	S (N.s/m³)
0	57	0,000	6.205
50	120	0,051	13.080
100	160	0,101	17.493
150	199	0,152	21.688
200	240	0,203	26.180
250	286	0,253	31.144
300	330	0,304	35.990
350	373	0,355	40.658
400	412	0,405	44.913
450	465	0,456	50.705
480	509	0,480	55.492

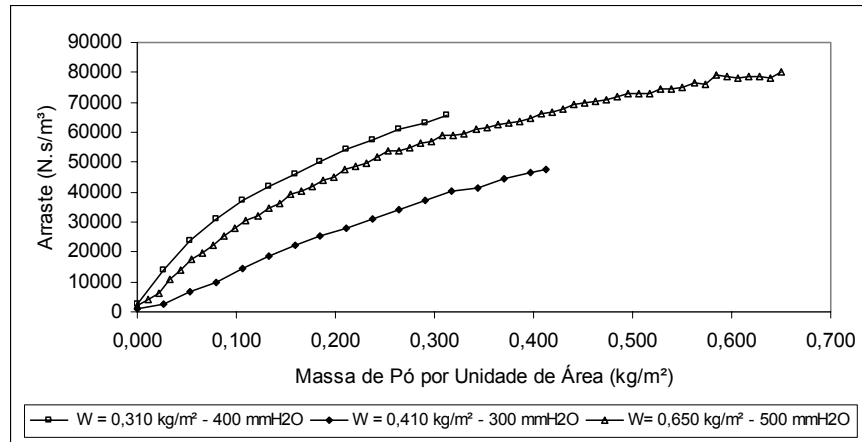


Figura B.1 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 6,0 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)

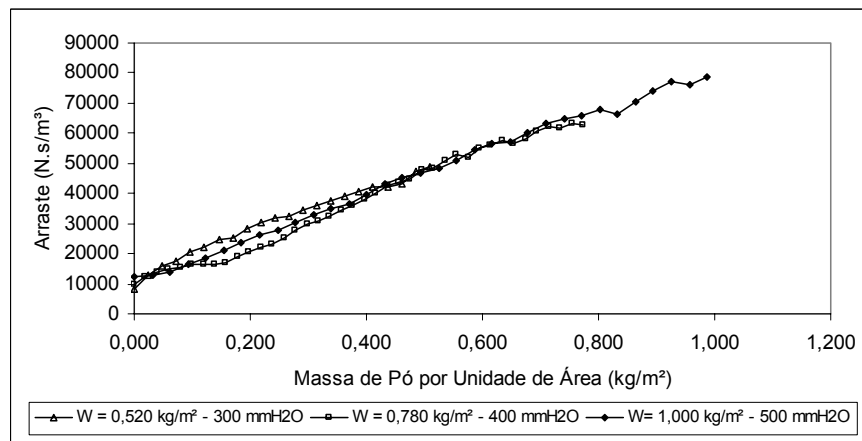


Figura B.2 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 6,0 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)

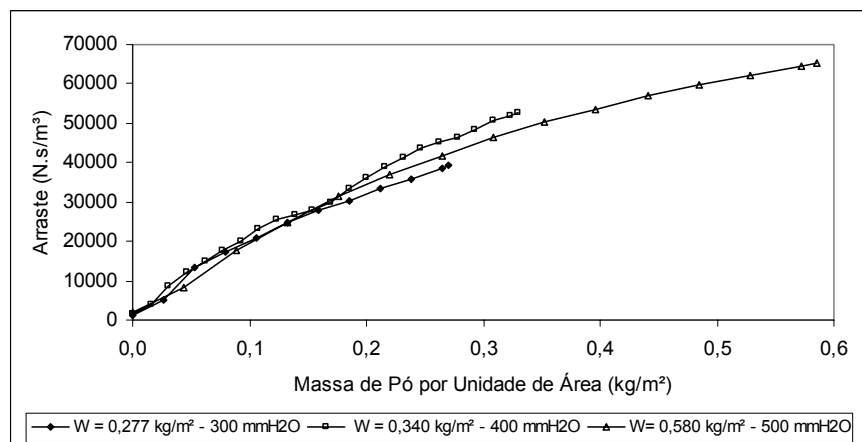


Figura B.3 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área) para velocidade de filtração de 7,5 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)

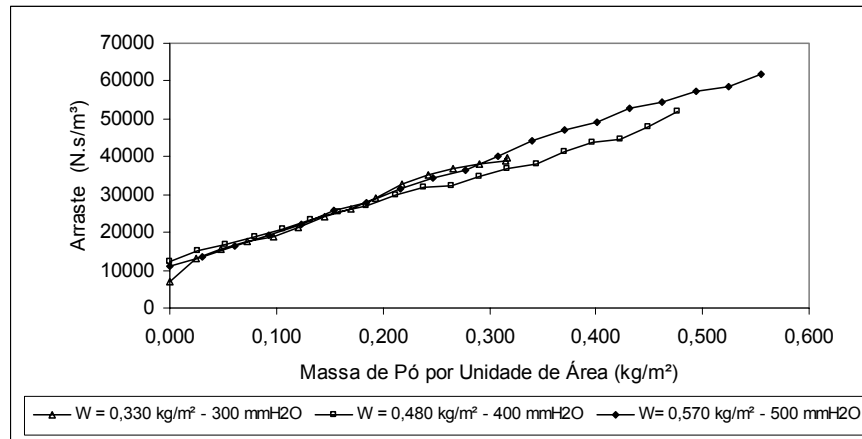


Figura B.4 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 7,5 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)

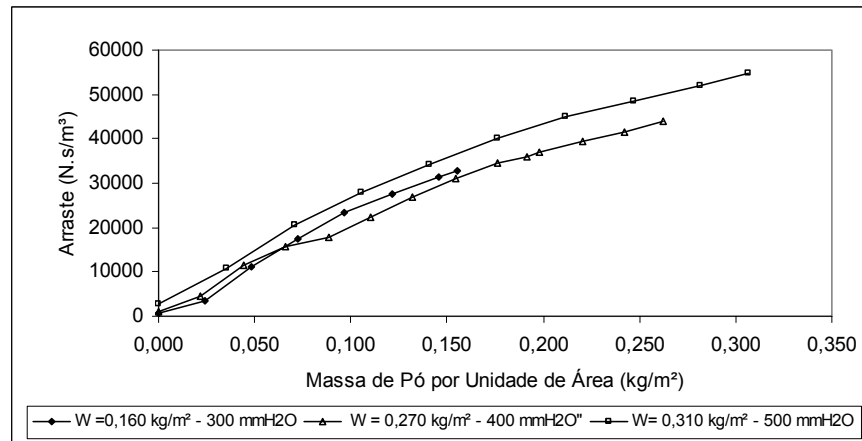


Figura B.5 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 9,0 cm/s em filtro de tecido de polipropileno para diferentes espessuras finais de torta (W)

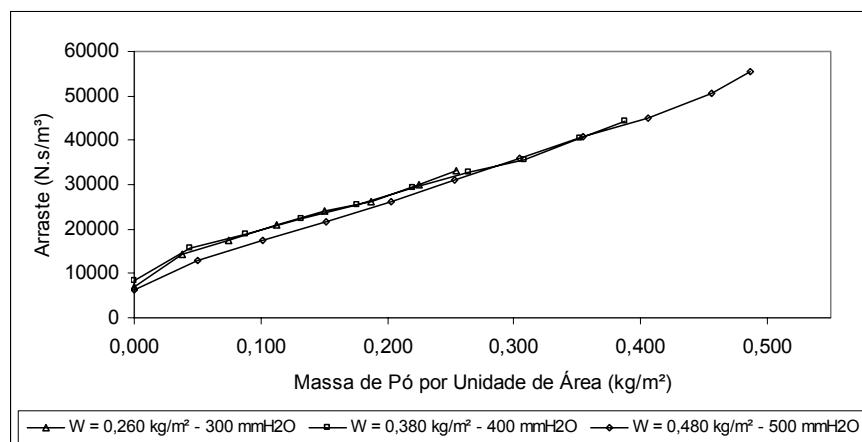


Figura B.6 – Arraste em função da massa de pó depositada por unidade de área para velocidade de filtração de 9,0 cm/s em filtro de tecido de algodão para diferentes espessuras finais de torta (W)

APÊNDICE C - DADOS DOS ENSAIOS PRELIMINARES DE REMOÇÃO

Tabela C.1 - Dados obtidos nos ensaios preliminares de remoção no tecido de polipropileno

Veloc. de Filtração (cm/s)	ΔP_f (mm H ₂ O)	Espessura da Torta (g/cm ²)	Fração Removida a 0,7 cm/s (%)	Fração Removida a 1,5 cm/s (%)	Fração Removida a 3,0 cm/s (%)	Fração Removida a 4,5 cm/s (%)	Fração Removida a 6,0 cm/s (%)	Fração Removida Total (%)
6	100	0,017	17,86	4,08	3,83	3,32	2,30	31,38
9	100	0,007	3,23	2,58	1,29	2,58	1,94	11,61
11	100	0,006	1,55	0,78	2,33	2,33	2,33	9,30
6	200	0,027	18,36	7,25	5,48	5,96	4,99	42,03
9	200	0,016	12,39	4,51	4,51	5,35	3,38	30,14

Tabela C.2 - Dados obtidos nos ensaios preliminares de remoção no tecido de algodão

Veloc. de Filtração (cm/s)	ΔP_f (mm H ₂ O)	Espessura da Torta (g/cm ²)	Fração Removida a 0,7 cm/s (%)	Fração Removida a 1,5 cm/s (%)	Fração Removida a 3,0 cm/s (%)	Fração Removida a 4,5 cm/s (%)	Fração Removida a 6,0 cm/s (%)	Fração Removida Total (%)
6	100	0,014	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	3,23
9	100	0,003	0,00	0,00	3,13	1,56	0,00	4,69
11	100	0,002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	200	0,053	2,07	1,98	1,07	1,07	1,40	7,60
9	200	0,035	0,00	0,88	1,51	1,76	1,51	5,65

APÊNDICE D – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE REMOÇÃO

Tabela D.1 – Dados de limpeza dos filtros de polipropileno para determinação da tensão de remoção das tortas

Velocidade de Filtração (cm/s)	Espessura da Torta (g/cm ²)	Velocidade de Limpeza (cm/s)	Fração de Massa Retida na Torta (γ)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)
4,5	0,064	2,8	0,550	13
		3,0	0,524	14
		9,0	0,195	23
		12,0	0,120	25
		15,0	0,094	31
		18,0	0,079	34
6,0	0,035	2,3	0,682	15
		3,0	0,634	17
		9,0	0,459	27
		12,0	0,397	32
		15,0	0,347	38
		18,0	0,308	42
7,5	0,027	2,2	0,785	12
		3,0	0,728	15
		9,0	0,535	23
		12,0	0,449	24
		15,0	0,419	30
		18,0	0,380	33
9,0	0,016	2,1	0,890	14
		3,0	0,865	16
		9,0	0,721	24
		12,0	0,662	26
		15,0	0,645	32
		18,0	0,611	35
4,5	0,098	2,4	0,211	8
		3,0	0,161	9
		9,0	0,049	24
		12,0	0,042	31
		15,0	0,037	34
		18,0	0,035	42
6,0	0,031	2,2	0,676	17
		3,0	0,594	22
		9,0	0,337	37
		12,0	0,256	40
		15,0	0,227	48
		18,0	0,194	55
7,5	0,034	2,1	0,762	15
		3,0	0,712	17
		9,0	0,470	25
		12,0	0,387	29
		15,0	0,330	32
		18,0	0,280	37

Continuação da Tabela D.1

9,0	0,027	2,1	0,832	14
		3,0	0,783	16
		9,0	0,585	24
		12,0	0,521	27
		15,0	0,464	31
		18,0	0,420	33
4,5	0,122	2,7	0,177	12
		3,0	0,173	14
		9,0	0,066	32
		12,0	0,032	40
		15,0	0,025	47
		18,0	0,023	55
6,0	0,065	2,7	0,557	12
		3,0	0,529	13
		9,0	0,222	24
		12,0	0,128	27
		15,0	0,090	32
		18,0	0,061	38
7,5	0,058	2,6	0,587	16
		3,0	0,545	17
		9,0	0,242	31
		12,0	0,163	34
		15,0	0,119	39
		18,0	0,100	45
9,0	0,031	2,2	0,778	15
		3,0	0,712	17
		9,0	0,393	32
		12,0	0,316	39
		15,0	0,258	46
		18,0	0,223	53
4,5	0,166	2,8	0,170	5
		3,0	0,167	7
		9,0	0,045	16
		12,0	0,037	22
		15,0	0,033	25
		18,0	0,031	30
6,0	0,079	2,4	0,522	8
		3,0	0,494	9
		9,0	0,188	16
		12,0	0,096	18
		15,0	0,058	23
		18,0	0,040	25

Tabela D.2 – Dados de limpeza dos filtros de algodão para determinação da tensão de remoção das tortas

Velocidade de Filtração (cm/s)	Espessura da Torta (g/cm ²)	Velocidade de Limpeza (cm/s)	Fração de Massa Retida na Torta (γ)	Queda de Pressão (mm H ₂ O)
4,5	0,063	1,6	0,845	24
		3,0	0,831	44
		9,0	0,755	121
		12,0	0,722	151
		15,0	0,688	174
		18,0	0,640	196
6,0	0,052	1,6	0,883	22
		3,0	0,864	40
		9,0	0,800	107
		12,0	0,751	137
		15,0	0,667	159
		18,0	0,651	190
7,5	0,033	1,6	0,942	24
		3,0	0,922	49
		9,0	0,843	123
		12,0	0,827	161
		15,0	0,767	180
		18,0	0,735	206
9,0	0,026	1,6	0,970	22
		3,0	0,939	49
		9,0	0,875	125
		12,0	0,855	158
		15,0	0,825	182
		18,0	0,785	283
4,5	0,135	1,6	0,758	24
		3,0	0,550	39
		9,0	0,505	112
		12,0	0,471	141
		15,0	0,441	168
		18,0	0,409	195
6,0	0,078	1,6	0,889	18
		3,0	0,571	33
		9,0	0,534	94
		12,0	0,510	122
		15,0	0,501	154
		18,0	0,471	182
7,5	0,048	1,6	0,959	23
		3,0	0,914	47
		9,0	0,823	130
		12,0	0,798	169
		15,0	0,769	199
		18,0	0,724	231

Continuação da Tabela D.2

9,0	0,038	1,6	0,23	0,998	27
		3,0	7,64	0,921	52
		9,0	4,51	0,876	139
		12,0	2,55	0,851	180
		15,0	2,55	0,825	211
		18,0	2,78	0,797	236
4,5	0,148	2,0	28,9	0,711	18
		3,0	41,0	0,301	42
		9,0	1,2	0,289	121
		12,0	1,8	0,271	151
		15,0	0,9	0,262	188
		18,0	1,7	0,245	215
6,0	0,100	1,5	11,0	0,890	23
		3,0	35,6	0,534	37
		9,0	2,4	0,510	108
		12,0	1,5	0,495	137
		15,0	1,2	0,483	161
		18,0	2,2	0,461	181
7,5	0,057	2,0	0,7	0,993	25
		3,0	11,8	0,875	47
		9,0	5,2	0,824	138
		12,0	2,2	0,802	175
		15,0	3,1	0,772	199
		18,0	4,5	0,726	217
9,0	0,048	1,6	7,88	0,921	31
		3,0	4,31	0,878	55
		9,0	4,03	0,838	145
		12,0	5,04	0,787	175
		15,0	2,11	0,766	219
		18,0	3,76	0,729	249

APÊNDICE E – GRÁFICOS PARA ESTIMATIVA DA TENSÃO DE REMOÇÃO

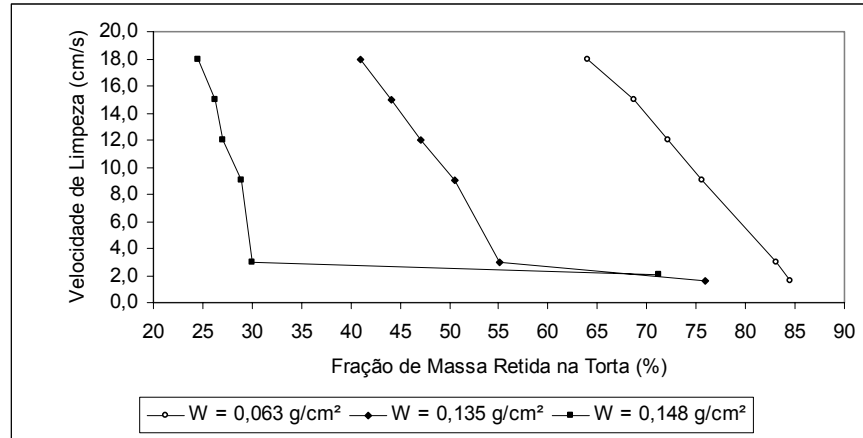


Figura E.1 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s

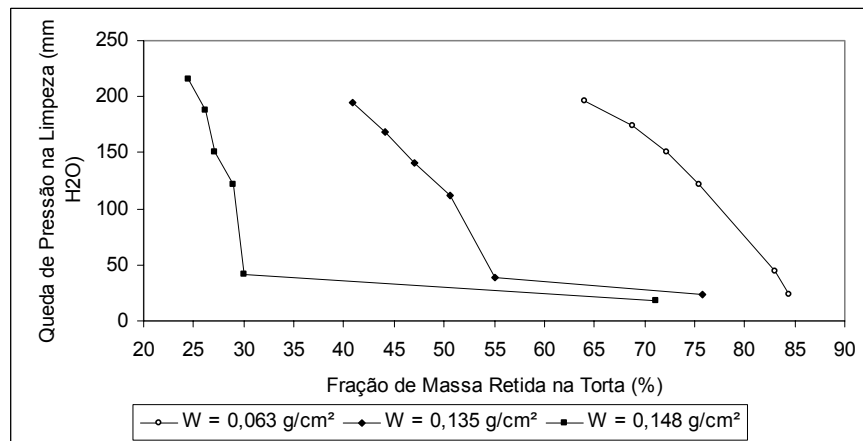


Figura E.2 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s

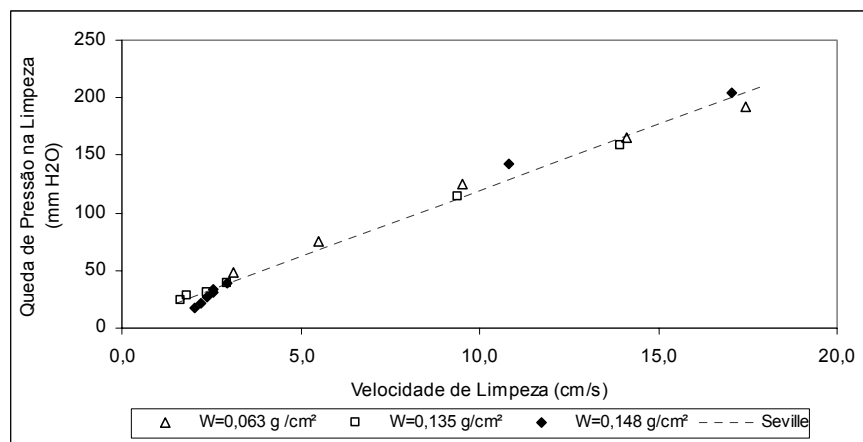


Figura E.3 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de algodão e velocidade de filtração de 4,5 cm/s

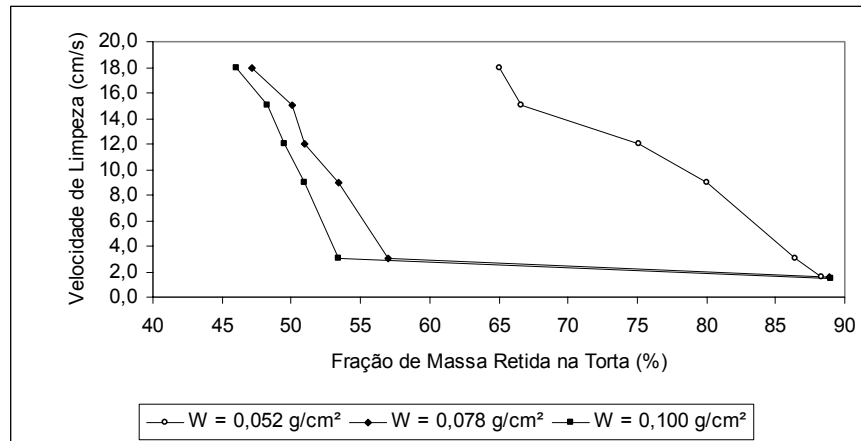


Figura E.4 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s

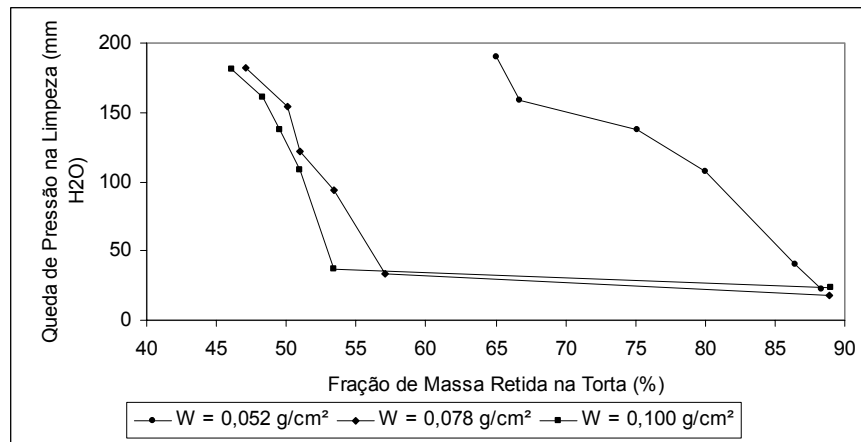


Figura E.5 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s

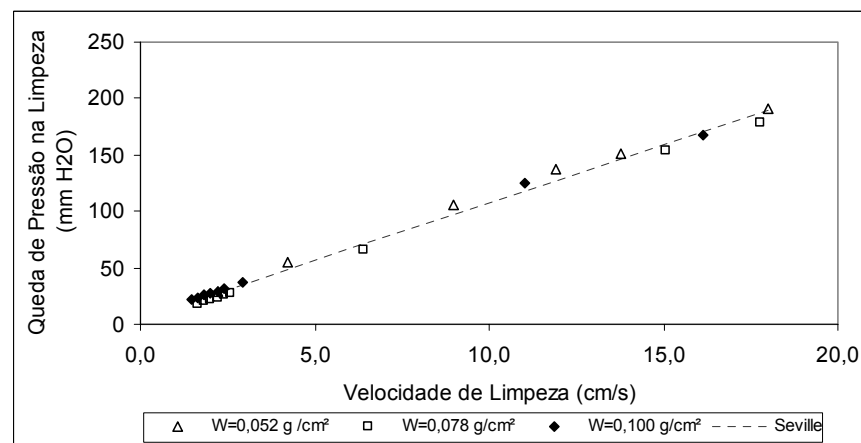


Figura E.6 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de algodão e velocidade de filtração de 6,0 cm/s

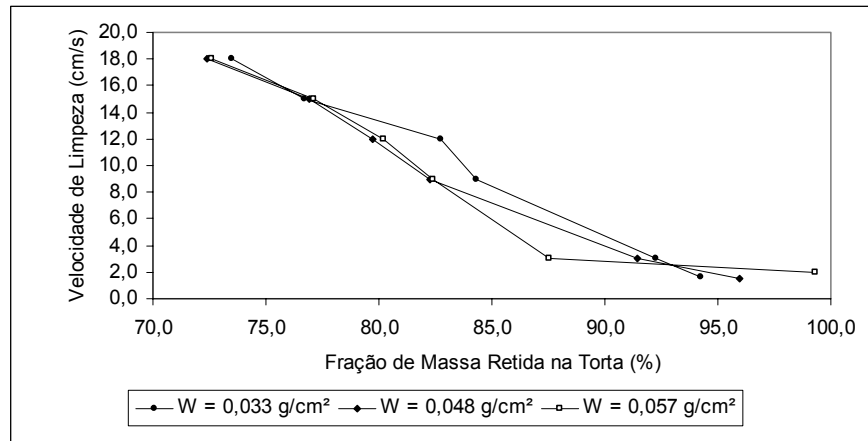


Figura E.7 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s

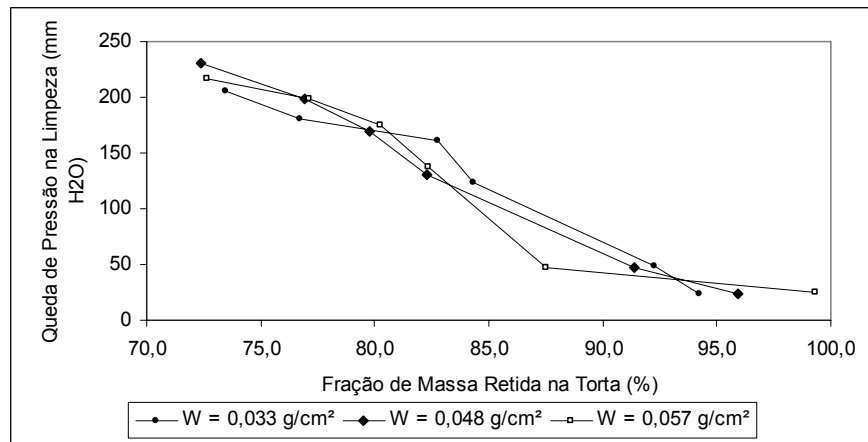


Figura E.8 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s

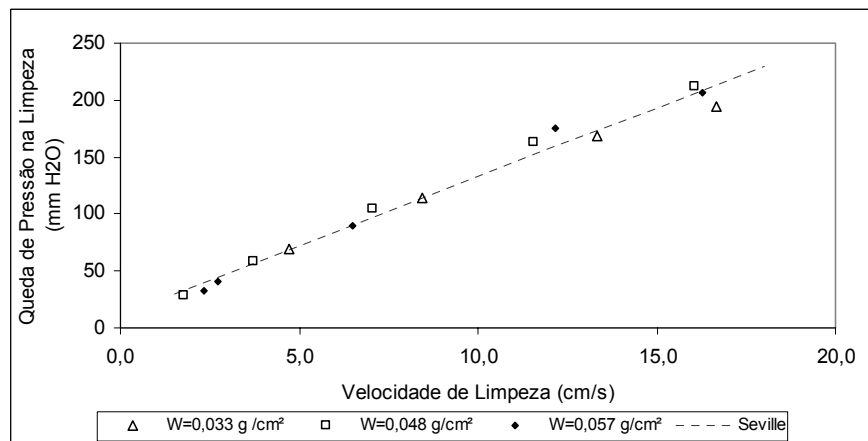


Figura E.9 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de algodão e velocidade de filtração de 7,5 cm/s

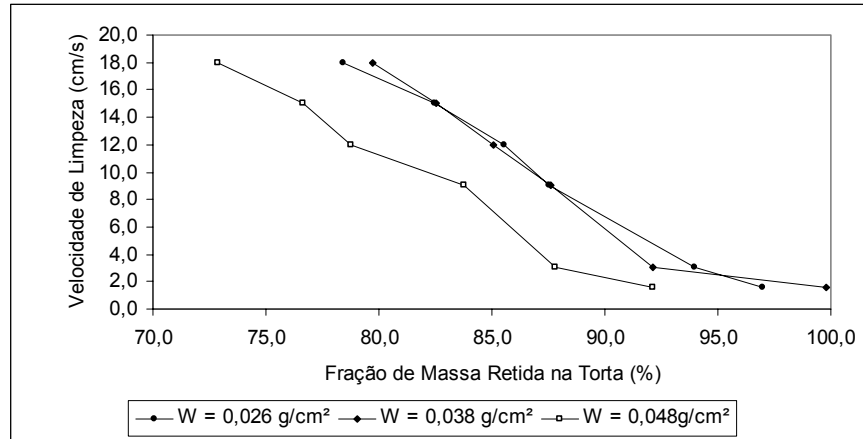


Figura E.10 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s

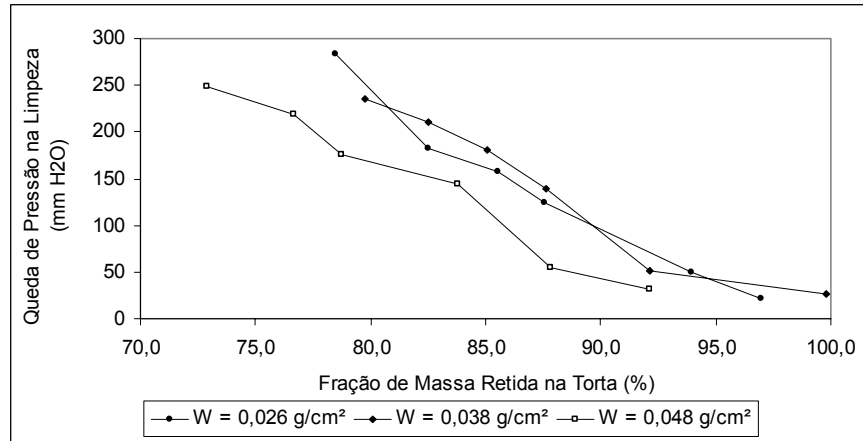


Figura E.11– Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de algodão em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s

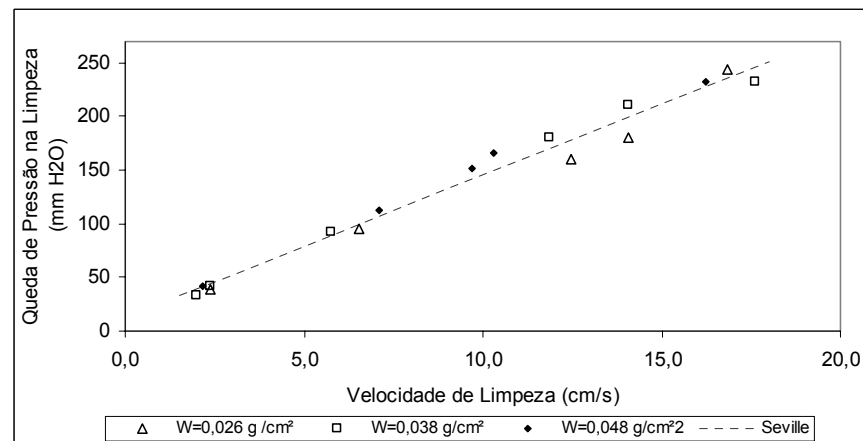


Figura E.12 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de algodão e velocidade de filtração de 9,0 cm/s

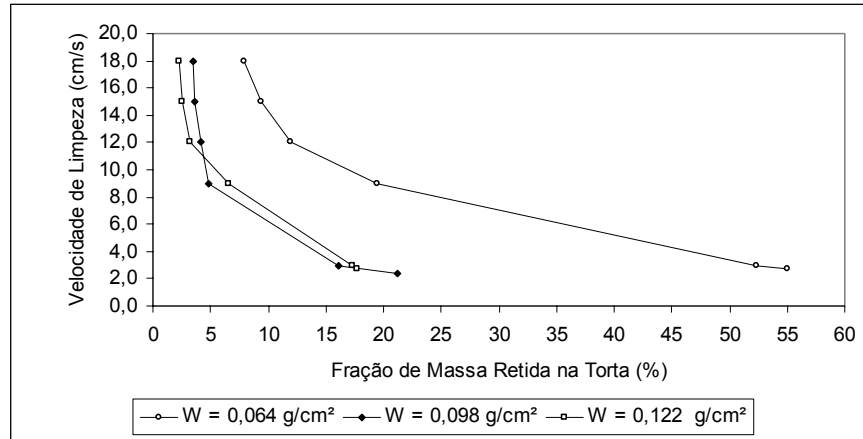


Figura E.13 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s

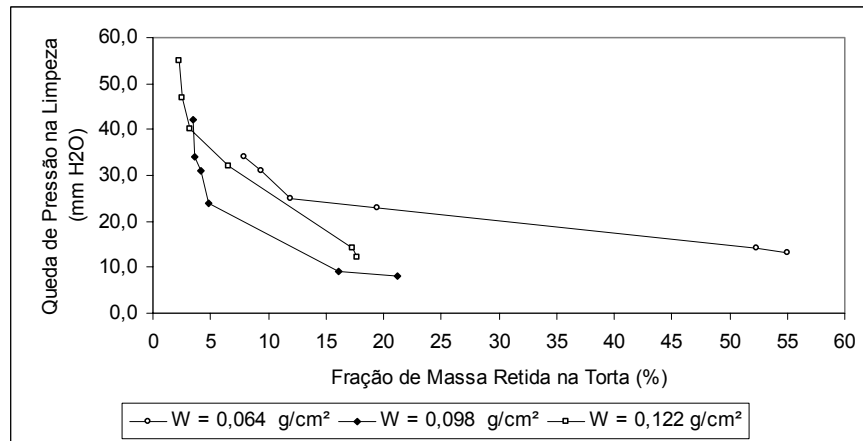


Figura E.14 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 4,5 cm/s

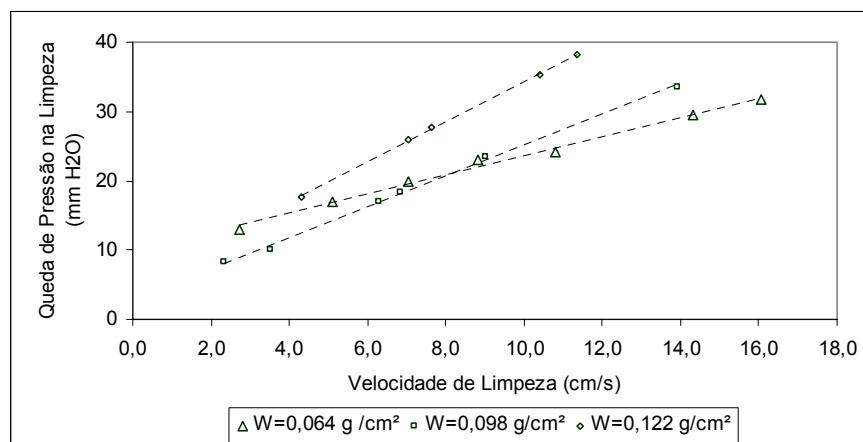


Figura E.15 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 4,5 cm/s

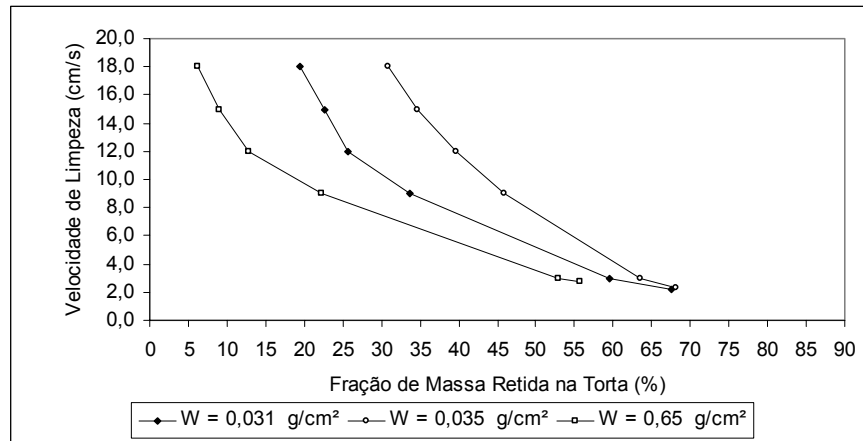


Figura E.16 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s

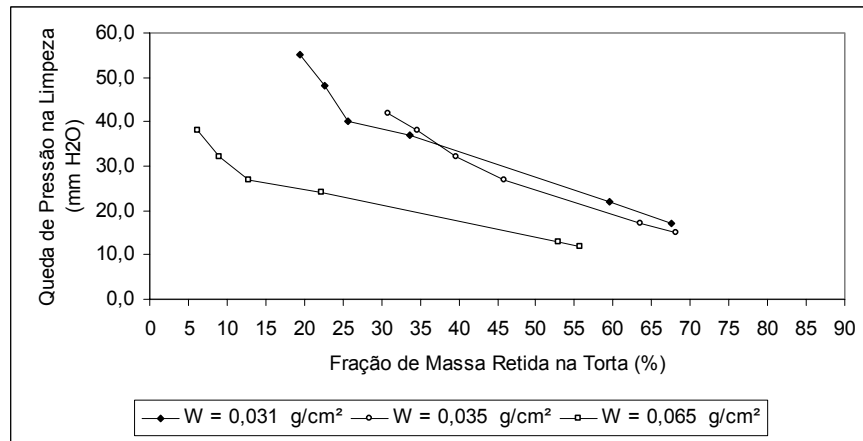


Figura E.17– Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 6,0 cm/s

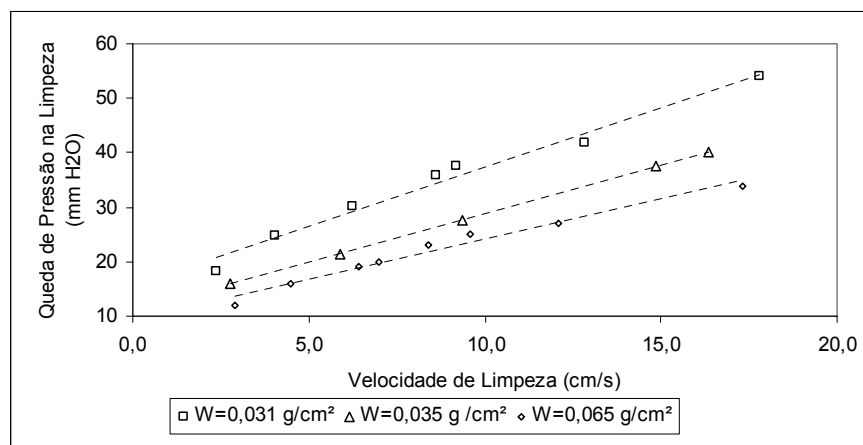


Figura E.18 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 6,0 cm/s

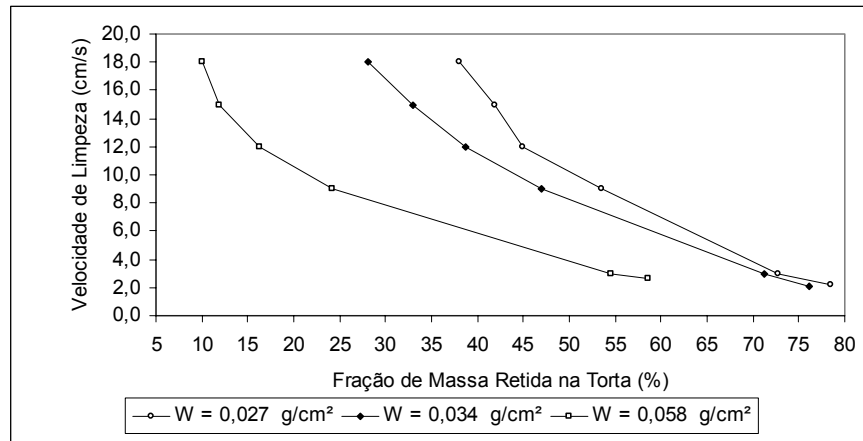


Figura E.19 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s

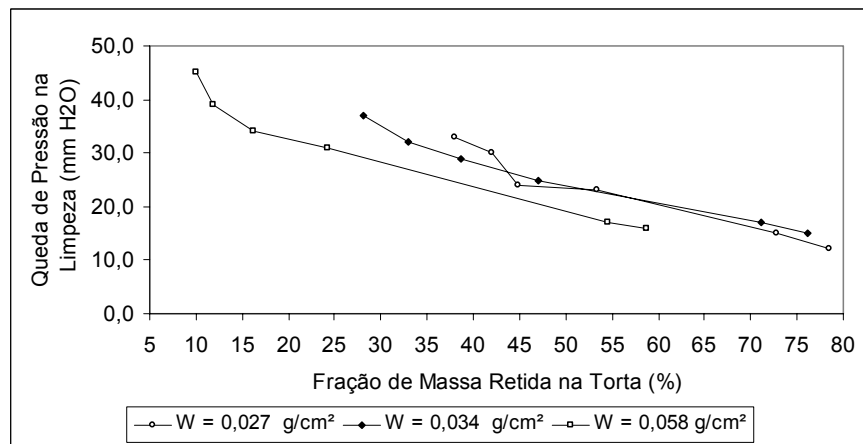


Figura E.20 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 7,5 cm/s

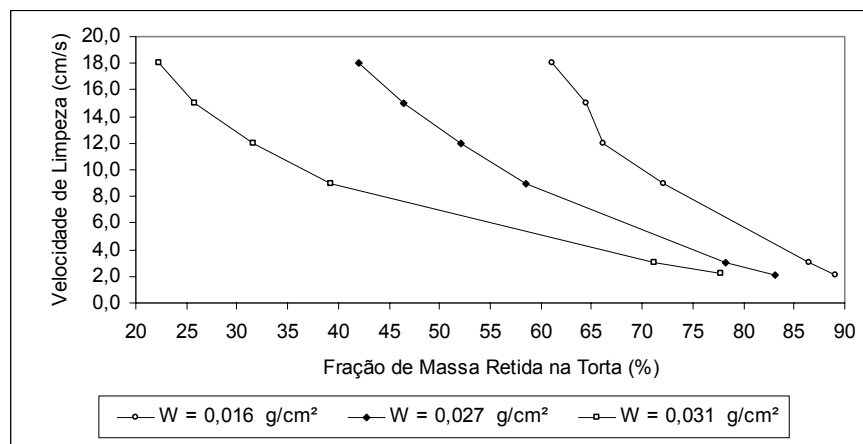


Figura E.21 – Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s

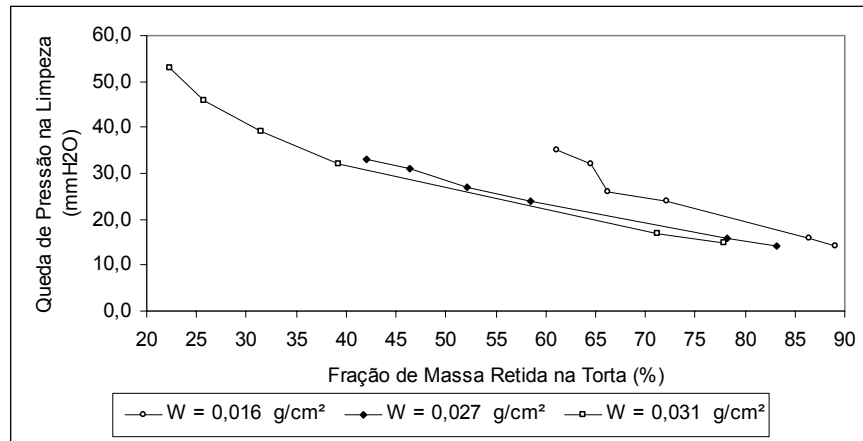


Figura E.22 – Queda de pressão de limpeza em função da fração de massa retida na torta para o filtro de polipropileno em tortas obtidas com velocidade de filtração de 9,0 cm/s

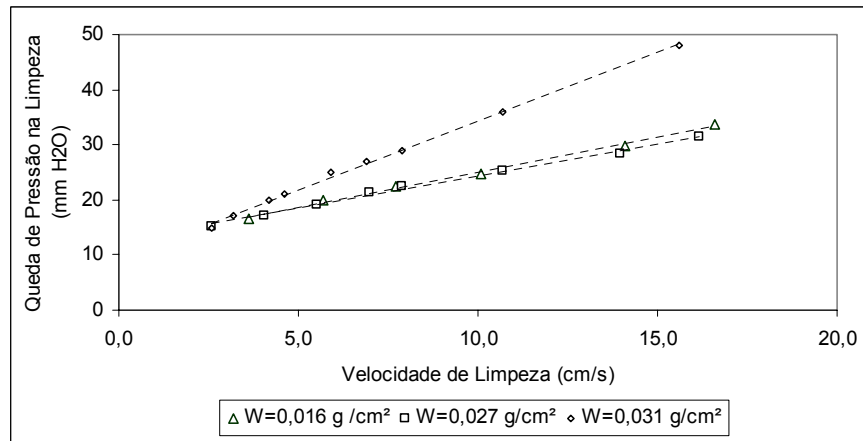


Figura E.23 – Queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza para o filtro de polipropileno e velocidade de filtração de 9,0 cm/s

APÊNDICE F – OUTROS RESULTADOS

Na realização dos experimentos de remoção, coletou-se amostras do pó removido em cada experimento para a avaliação do diâmetro de partícula que era removida no analisador de granulometria Mastersizer Malvern Microplus 2.19. Os resultados obtidos para os diâmetros médios de partícula encontrados para cada condição de filtração, são apresentados nas Tabelas F.1 e F.2 deste apêndice.

As Figuras F.1 e F.2 apresentam os gráficos do diâmetro médio de partícula em função da velocidade de filtração respectivamente para os tecidos de algodão e de polipropileno, em que cada ponto representa a média do diâmetro médio de partículas removidas em cada velocidade de filtração.

Conforme se observa nessas figuras, houve uma tendência de diminuição do diâmetro médio de partícula removida da torta com o aumento da velocidade de filtração (V_f), o que a princípio pode parecer estranho, pois era de se esperar que com o aumento da velocidade de filtração as partículas maiores não sedimentassem na tubulação do equipamento e fossem arrastadas pelo fluxo até a torta o que deveria fazer com que o diâmetro médio das partículas da torta aumentasse com o aumento da velocidade de filtração. Entretanto, as partículas analisadas em cada experimento não foram propriamente as partículas constituintes da torta com um todo, mas sim as que foram removidas nas primeiras velocidades de filtração, ou seja, as que estavam inseridas nas tortas com menor força de adesão pois, nestas velocidades, o esforço de remoção é menor. Pode-se citar também que nas velocidades mais altas de limpeza ocorre o desprendimento das partículas que penetraram mais profundamente no tecido.

Segundo a expressão final da teoria de Rumpf (28), a tensão de ruptura de um aglomerado (σ_r) é inversamente proporcional à sua porosidade (ε) e aos quadrados do

diâmetro de partícula (d_p) e da distância de separação entre as partículas (a). Isso quer dizer que há um aumento da tensão de ruptura do aglomerado com a diminuição da distância efetiva de separação das partículas, que deve diminuir com o aumento da velocidade de filtração, que proporciona maior compactação ao aglomerado, e que as partículas maiores são as que estão inseridas com menores forças de adesão em um aglomerado.

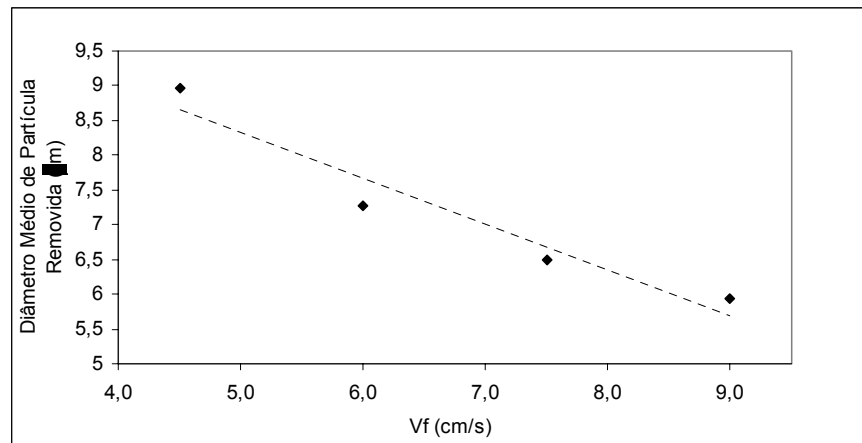


Figura F.1 – Diâmetro médio de partícula removida da torta em função da velocidade de filtração para o tecido de algodão

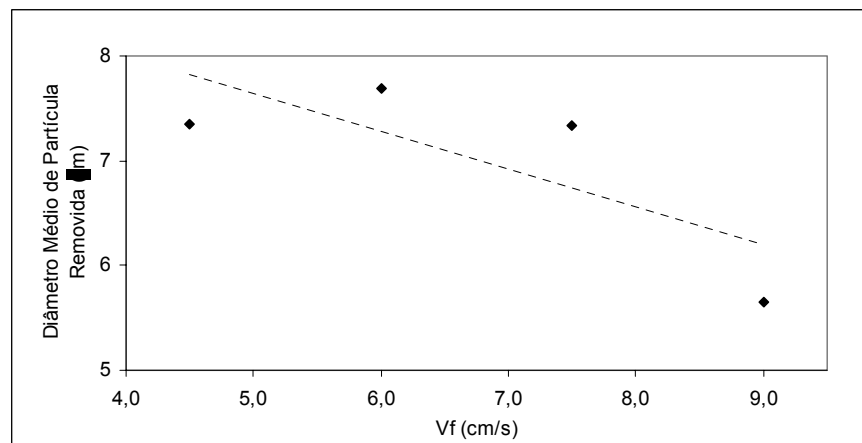


Figura F.2 – Diâmetro médio de partícula removida da torta em função da velocidade de filtração para o tecido de polipropileno

Como pode-se observar nas tabelas D.1 e D.2 do Apêndice D, as frações removidas nas primeiras velocidades de limpeza aumentaram com a diminuição da velocidade de filtração, o que pode significar que nas condições de alta remoção tem-se

uma maior quantidade de partículas de maior diâmetro, o que também está associado à maior distância de separação entre partículas e maior porosidade do aglomerado, e que explica a tendência observada.

Tabela F.1 – Dados de remoção para o tecido de algodão

DPf (mm H₂O)	V_f (cm/s)	F.Rem. Total (%)	W (g/cm²)	Patchy Cleaning	dp (µm)
300	9,0	22	0,026	1	5,81
300	7,5	27	0,033	1	6,70
300	6,0	35	0,052	2	8,68
300	4,5	36	0,063	3	7,40
400	9,0	20	0,038	1	5,46
400	7,5	28	0,048	2	6,36
400	6,0	53	0,078	3	6,48
400	4,5	59	0,135	4	11,66
500	9,0	27	0,048	1	6,54
500	7,5	27	0,057	2	6,42
500	6,0	54	0,100	3	6,65
500	4,5	76	0,148	4	7,84

Tabela F.2 – Dados de remoção para o tecido de polipropileno

DPf (mm H₂O)	V_f (cm/s)	F.Rem. Total (%)	W (g/cm²)	Patchy Cleaning	dp (µm)
300	4,5	92	0,064	3	8,12
300	6,0	69	0,035	2	10,32
300	7,5	62	0,027	2	8,57
300	9,0	39	0,016	1	4,7
400	4,5	96	0,098	4	6,93
400	6,0	81	0,031	2	7,8
400	7,5	72	0,034	2	6,12
400	9,0	58	0,027	2	5,78
500	4,5	98	0,122	4	6,99
500	6,0	94	0,065	4	4,94
500	7,5	90	0,058	3	7,34
500	9,0	78	0,031	2	6,48