



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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS EM  
DIFERENTES MEIOS FILTRANTES**

**Eduardo Hiromitsu Tanabe**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

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

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE  
DIFERENTES MEIOS FILTRANTES**

Eduardo Hiromitsu Tanabe  
Orientadora: Prof.Dra. Mônica Lopes 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 em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

**São Carlos – SP  
2008**

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

T161ec

Tanabe, Eduardo Hiromitsu.

Estudo do comportamento da deposição das partículas em diferentes meios filtrantes / Eduardo Hiromitsu Tanabe. - São Carlos : UFSCar, 2008.  
152 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2008.

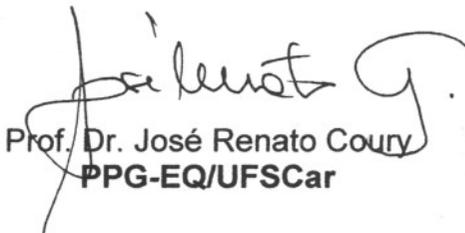
1. Filtração de gases. 2. Filtros de tecido. 3. Planejamento experimental. I. Título.

CDD: 660.284245 (20<sup>a</sup>)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE  
**EDUARDO HIROMITSU TANABE** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
SÃO CARLOS, EM 17 DE MARÇO DE 2008.

BANCA EXAMINADORA:

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

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

  
Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno  
**FEQ/UFU**

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por nunca me abandonar nos momentos difíceis de minha vida e sempre estar direcionando os meus caminhos.

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

À Professora Mônica Lopes Aguiar pela dedicação, sugestões, apoio, compreensão e por acreditar e confiar em meu trabalho. Gostaria de agradecer também pela grande amizade construída durante todo esse tempo de mestrado.

Ao Professor José Renato Coury e a Doutora Ana Beatriz Neves Brito pela contribuição e sugestões no Exame de Qualificação.

Aos amigos do laboratório de controle ambiental, aos técnicos Juliana, Tiago e Oscar, e a todas as pessoas que me ajudaram direta e indiretamente neste trabalho.

Aos amigos Edison Ricco Júnior, Lucas Meili, Robson Costa (Capixaba), César Augusto da Rosa, André Felkl, André Leopoldo, Marcos Vinícius, Roger, Alexandre Bôscaro (Carioca) pela amizade construída durante todo este tempo de mestrado.

Às amigas Leticia Marciniuk, Ivana Cruz, Elyzabeth Fontoura, Ballu, Bruna Nascimento, Renata de Aquino, Ediane Scherer, Aruana Barros, Camila Silva, Natália Feitosa, Patrícia Nagliate, Vádila Guerra, Débora Felisoni, Ana Oehler, Laura Siqueira, Nickeli Rossi pela grande amizade que conquistei durante este tempo de convivência em São Carlos.

Às amigas que estão mais distantes Maureen Evelize, Patrícia Kuroiwa e Alessandra Kuroiwa. À Elis de Souza que sempre me incentivou neste trabalho e pela amizade construída.

Aos velhos amigos Rodrigo Béttega e Alexandre Gallas pela grande amizade construída nos tempos de graduação. Ao grande amigo Marcos Felicetti pela ajuda e força durante todo o trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

Ao departamento de Engenharia Química pela estrutura e equipamentos utilizados no trabalho.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>ii</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1. Classificação dos tecidos de filtração</b> .....	<b>4</b>
2.1.1. Tecidos Trançados.....	<b>7</b>
2.1.2. Tecidos não trançados ou feltros.....	<b>8</b>
<b>2.2. Métodos de tratamentos de tecidos ou finalização</b> .....	<b>11</b>
<b>2.3. Mecanismo de captura de material particulado</b> .....	<b>14</b>
<b>2.4. Formação das tortas de filtração</b> .....	<b>17</b>
<b>2.5. Ciclos de filtração</b> .....	<b>21</b>
<b>2.6. Remoção das tortas de filtração</b> .....	<b>24</b>
<b>2.7. Técnica de limpeza dos filtros</b> .....	<b>26</b>
<b>2.8. Parâmetros importantes no processo de filtração</b> .....	<b>28</b>
2.8.1. Queda de pressão.....	<b>28</b>
2.8.2. Velocidade de filtração.....	<b>30</b>
2.8.3. Porosidade do meio filtrante.....	<b>31</b>
2.8.4. Porosidade da torta.....	<b>32</b>
2.8.5. Permeabilidade do meio filtrante.....	<b>33</b>
<b>2.9. Estudos Experimentais</b> .....	<b>35</b>
<b>3. Materiais e métodos</b> .....	<b>40</b>
<b>3.1. Caracterização dos materiais pulverulentos</b> .....	<b>40</b>
<b>3.2. Caracterização dos meios filtrantes</b> .....	<b>41</b>
<b>3.3. Equipamentos de filtração e coleta de dados</b> .....	<b>43</b>

3.3.1. Alimentação do pó.....	44
3.3.2. Sistema de filtração.....	45
3.3.3. Sistema de aquisição de dados.....	47
3.3.4. Calibração da placa de orifício.....	47
3.4. Procedimento experimental.....	48
3.4.1. Ensaios gerais.....	48
3.4.2. Obtenção das fotografias no MEV.....	49
3.4.3. Análise de Imagens.....	49
3.5. Cálculo da perda de carga residual teórico.....	50
3.6. Planejamento de experimento fatorial.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1. Ensaios de filtração.....	53
4.2. Estudo da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico.....	55
4.3. Estudo da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno.....	58
4.4. Estudo da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado.....	61
4.5. Comparações da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática entre os diferentes meios filtrantes.....	64
4.6. Determinação da perda de carga residual teórico.....	68
4.7. Estudo da profundidade de deposição das partículas de polvilho doce no tecido de poliéster tratado.....	72
4.8. Estudo da profundidade de deposição das partículas de polvilho doce no tecido de poliéster não tratado.....	74
4.9. Comparação da profundidade de deposição das partículas de polvilho doce nos tecidos de poliéster tratado e poliéster sem tratamento.....	77
4.10. Comparação da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática e polvilho doce no tecido de poliéster tratado.....	79
4.11. Estudo do efeito das variáveis operacionais na profundidade de deposição das partículas no tecido de poliéster tratado.....	82

<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>89</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>91</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>103</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>145</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>152</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área superficial de torta [L <sup>2</sup> ]
dc	Diâmetro do coletor [L]
dp	Diâmetro de partículas [L]
Kc	Resistência da torta [t <sup>-1</sup> ]
Km	Resistência do meio filtrante [M L <sup>-2</sup> t <sup>-2</sup> ]
K <sub>1</sub>	Coefficiente de permeabilidade [M <sup>2</sup> ]
L	Espessura do meio filtrante [L]
M	Massa de torta [M]
P	Profundidade de deposição [M]
Q	Vazão mássica de pó [M t <sup>-1</sup> ]
S	Arraste efetivo [M L <sup>-2</sup> t <sup>-1</sup> ]
V	Velocidade superficial de filtração [L t <sup>-1</sup> ]
V <sub>f</sub>	Velocidade filtração [L t <sup>-1</sup> ]
V <sub>s</sub>	Velocidade do fluido [L t <sup>-1</sup> ]
t	Tempo de filtração [t]
t <sub>f</sub>	Tempo de filtração [t <sup>-1</sup> ]
W	Massa de pó depositada por unidade de área [M L <sup>-2</sup> ]

## LETRAS GREGAS

ΔH	Diferença de altura [L]
ΔP	Perda de carga [M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
ΔP <sub>c</sub>	Queda de pressão devido à formação da torta [M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
ΔP <sub>m</sub>	Queda de pressão no meio filtrante [M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
ΔP <sub>t</sub>	Queda de pressão total [M L <sup>-1</sup> t <sup>-2</sup> ]
ε	porosidade
μ	viscosidade [M L <sup>-1</sup> t <sup>-1</sup> ]
ρ	Densidade [M L <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>g</sub>	Densidade do gás [M L <sup>-3</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	Densidade do sólido [M L <sup>-3</sup> ]

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Tipos de torcidas utilizadas na confecção de fios.....	6
Figura 2.2	Tipos de confecção de fios sintéticos.....	7
Figura 2.3	Tipos de tecidos trançados.....	8
Figura 2.4	Tipos de tecidos: a) trançado:trama plana; b) trançado:trama sarja 2/1; c)feltro agulhado.....	10
Figura 2.5	Mecanismo de captura por interceptação direta.....	14
Figura 2.6	Mecanismo de captura por difusão ou movimento Browniano.....	15
Figura 2.7	Mecanismo de captura por impactação inercial.....	16
Figura 2.8	Mecanismo de captura por gravidade.....	16
Figura 2.9	Mecanismo de coleta eletrostática: (a) Coulômbico e (b) Dipolo Imagem.....	17
Figura 2.10	Ilustração da Filtração de profundidade.....	17
Figura 2.11	Fotografias com a formação de dendritos no tecido.....	18
Figura 2.12	Formação da torta de filtração.....	19
Figura 2.13	Ilustração da Filtração de Superfície.....	19
Figura 2.14	Determinação do ponto de colmatação do meio.....	20
Figura 2.15	Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração.....	21
Figura 2.16	Ciclos de filtração ideais.....	22
Figura 2.17	Ciclos de filtração reais.....	23
Figura 2.18	Ciclos de filtração reais, com comportamento de limpeza por blocos.....	24
Figura 2.19	(a) Superfície do meio filtrante com a torta de filtração e (b) Fenômeno Patchy Cleaning e (c) Imagem do fenômeno patchy cleaning geradas no microscópio ótico.....	25
Figura 2.20	Filtração do gás sujo com a posterior limpeza pela técnica de vibração.....	26
Figura 2.21	Filtração do gás sujo com a posterior limpeza pela técnica do fluxo de ar reverso.....	27
Figura 2.22	Limpeza pela técnica do pulso de ar: a) Filtração do gás e b) processo de limpeza.....	28
Figura 3.1	Foto em microscopia eletrônica: a) rocha fosfática e b) polvilho doce.....	41
Figura 3.2	Fotos da superfície dos tecidos: a) Polipropileno, b) Acrílico, c) Poliéster tratado e d) Poliéster não tratadocom aumento de 50 vezes.....	43
Figura 3.3	Esquema geral do equipamento de filtração e limpeza.....	44
Figura 3.4	Esquema do alimentador de pó.....	45
Figura 3.5	Esquema da caixa de filtração.....	46
Figura 3.6	Posicionamento da caixa de filtração: a) processo de filtração e b) processo Limpeza.....	46
Figura 3.7	Ilustração da seção transversal do tecido desde da superfície torta-ar até aproximadamente 500µm de profundidade, com aumento de 2000 vezes, geradas no MEV.....	49
Figura 3.8	Microfotografia das partículas no meio filtrante a) original e b) binarizada com um aumento de 2000 vezes.....	50
Figura 4.1	Evolução da perda de carga utilizando como material particulado à rocha fosfática.....	54
Figura 4.2	Evolução da perda de carga utilizando como material particulado o polvilho.....	54
Figura 4.3	Seção transversal do filtro de acrílico e rocha fosfática em diferentes ciclos.....	55

Figura 4.4	Comportamento do diâmetro médio das partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico em relação à profundidade de deposição.....	56
Figura 4.5	Comportamento do número médio de partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico em relação à profundidade de deposição.....	57
Figura 4.6	Seção transversal do filtro de polipropileno e rocha fosfática em diferentes ciclos.....	58
Figura 4.7	Comportamento do diâmetro médio das partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno em relação à profundidade de deposição.....	59
Figura 4.8	Comportamento do número médio de partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno em relação à profundidade de deposição.....	60
Figura 4.9	Seção transversal do filtro de poliéster tratado e rocha fosfática em diferentes ciclos.....	62
Figura 4.10	Comportamento do diâmetro médio das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado em relação à profundidade de deposição.....	62
Figura 4.11	Comportamento do número médio de partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado em relação à profundidade de deposição das partículas..	63
Figura 4.12	Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática para diferentes tipos de tecidos.....	65
Figura 4.13	Perda de carga residual em cada ciclo de filtração para a rocha fosfática.....	67
Figura 4.14	Comparativos da perda de carga residual experimental e teórica.....	69
Figura 4.15	Eficiência teórica e experimental para o tecido de acrílico.....	70
Figura 4.16	Eficiência teórica e experimental para o tecido de polipropileno.....	70
Figura 4.17	Eficiência teórica e experimental para o tecido de poliéster tratado.....	71
Figura 4.18	Seção transversal do filtro de poliéster tratado e polvilho doce em diferentes ciclos.....	72
Figura 4.19	Comportamento do número médio de partículas de polvilho doce no tecido de poliéster tratado em relação à profundidade de deposição.....	73
Figura 4.20	Seção transversal do filtro de poliéster não tratado e polvilho doce em diferentes ciclos.....	75
Figura 4.21	Comportamento do número médio de partículas de polvilho doce no tecido de poliéster não tratado em relação à profundidade de deposição.....	75
Figura 4.22	Profundidade média de deposição de partículas de polvilho doce nos tecidos de poliéster tratado e sem tratamento.....	77
Figura 4.23	Perda de carga residual em cada ciclo de filtração para o polvilho doce.....	78
Figura 4.24	Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática e polvilho doce no tecido de poliéster tratado.....	80
Figura 4.25	Perda de carga residual em cada ciclo de filtração para o tecido de poliéster tratado.....	81
Figura 4.26	Comportamento da curva de filtração para tempo 400 s.....	82
Figura 4.27	Comportamento da curva de filtração para tempo 800s.....	82
Figura 4.28	Comportamento da curva de filtração para tempo de 1200 s.....	82
Figura 4.29	Diagrama de Pareto.....	84
Figura 4.30	Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo para a profundidade média de deposição.....	87
Figura 4.31	(a) Superfície de resposta e (b) curva de contorno para a profundidade média de deposição das partículas em função da velocidade de filtração e do tempo de filtração.....	87

Figura A.1	Equipamento para o pré-endurecimento da amostra.....	100
Figura A.2	Vista do equipamento de embutimento.....	101
Figura C.1	Fluxograma das etapas otimização de um processo.....	150
Figura D.1	Distribuição granulométrica das partículas de concentrado fosfático, de polvilho doce e de maisena.....	152

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Algumas aplicações dos tecidos utilizados para filtração.....	12
Tabela 2.2	Propriedades gerais das fibras dos tecidos.....	13
Tabela 3.1	Caracterização do Material pulverulento.....	41
Tabela 3.2	Características dos meios filtrantes.....	42
Tabela 3.3	Valores utilizados no planejamento fatorial.....	51
Tabela 3.4	Matriz com os valores utilizados no planejamento experimental.....	52
Tabela 4.1	Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico.....	57
Tabela 4.2	Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno.....	61
Tabela 4.3	Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado.....	64
Tabela 4.4	Resultados da perda de carga residual teórico e experimental.....	68
Tabela 4.5	Profundidade média de deposição das partículas de polvilho doce no tecido de poliéster tratado.....	74
Tabela 4.6	Profundidade média de deposição das partículas do polvilho doce no tecido de poliéster não tratado.....	76
Tabela 4.7	Matriz com os valores dos ensaios de filtração com os resultados da profundidade de deposição das partículas.....	83
Tabela 4.8	Estimativa dos efeitos das variáveis para a profundidade média de deposição.....	84
Tabela 4.9	Coefficiente de regressão para a profundidade média de deposição das Partículas.....	85
Tabela 4.10	Análise de variância para a profundidade média de deposição.....	86
Tabela B1	Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 1: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	104
Tabela B2	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no acrílico para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 1.....	105
Tabela B3	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 1.....	105
Tabela B4	Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 2: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	106
Tabela B5	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no acrílico para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 2.....	107
Tabela B6	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 2.....	107
Tabela B7	Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 3: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	108
Tabela B8	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no acrílico para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 3.....	109
Tabela B9	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 3.....	109
Tabela B10	Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 5: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	110

Tabela B11	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no acrílico para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 5.....	111
Tabela B12	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 5.....	112
Tabela B13	Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 10: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	112
Tabela B14	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no acrílico para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 10.....	113
Tabela B15	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 10.....	114
Tabela B16	Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo 1: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	115
Tabela B17	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no polipropileno para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 1.....	115
Tabela B18	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 1.....	116
Tabela B19	Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo 2: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	117
Tabela B20	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no polipropileno para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 2.....	118
Tabela B21	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 2.....	118
Tabela B22	Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo 3: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	119
Tabela B23	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no polipropileno para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 3.....	120
Tabela B24	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 3.....	120
Tabela B25	Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo 5: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	121
Tabela B26	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no polipropileno para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 5.....	122
Tabela B27	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 5.....	122
Tabela B28	Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo 10: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	123
Tabela B29	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no polipropileno para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 10.....	124
Tabela B30	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 10.....	125
Tabela B31	Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 1: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	125
Tabela B32	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 1.....	126
Tabela B33	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 1.....	127
Tabela B34	Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo	

	2: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	128
Tabela B35	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 2.....	128
Tabela B36	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 2.....	129
Tabela B37	Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 3: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	130
Tabela B38	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 3.....	130
Tabela B39	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 3.....	131
Tabela B40	Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 5: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	132
Tabela B41	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 5.....	133
Tabela B42	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 5.....	133
Tabela B43	Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 10: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.....	134
Tabela B44	Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 10.....	135
Tabela B45	Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 10.....	135
Tabela B46	Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 1.....	136
Tabela B47	Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 2.....	137
Tabela B48	Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 3.....	138
Tabela B49	Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 5.....	138
Tabela B50	Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 10.....	139
Tabela B51	Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 1.....	140
Tabela B52	Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 2.....	141
Tabela B53	Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 3.....	142

Tabela B54 Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 5.....	143
Tabela B55 Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 10.....	144

## RESUMO

Muitos estudos relacionados aos filtros de mangas estão focados na minimização energética do processo. Almejando ciclos de filtração mais longos, menor frequência de limpeza e maior vida útil do filtro, tais estudos buscam tecidos que apresentem maior facilidade de remoção da torta e menor perda de carga residual. Existem muitos estudos relacionados com a formação e remoção das tortas de filtração, mas pouco se sabe sobre o comportamento das partículas depositadas no interior do meio filtrante e qual a influência destas partículas no desempenho dos filtros. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi investigar o comportamento da deposição das partículas no interior de diferentes meios filtrantes e materiais particulados após o processo de limpeza, realizando um estudo microscópico, para avaliar o impacto destas partículas na regeneração do tecido. Os materiais particulados utilizados foram a rocha fosfática e o polvilho doce, com os meios filtrantes de poliéster tratado, de poliéster não tratado, de polipropileno e de acrílico.

Os ensaios de filtração foram realizados com uma velocidade de filtração de 0,10 m/s. O processo de remoção da torta foi através do fluxo de ar reverso com uma velocidade de limpeza de 0,12 m/s. A perda de carga máxima admitida nos ensaios de filtrações foi 980 Pa.

Verificou-se, utilizando a rocha fosfática e os tecidos de acrílico, de polipropileno e de poliéster tratado, que a profundidade de deposição das partículas no tecido de polipropileno foi menor em relação aos outros dois tecidos estudados. Contudo, a perda de carga residual deste tecido foi maior, mostrando que o acúmulo do material particulado neste meio filtrante proporcionou uma maior resistência ao fluxo, devido ao menor espaçamento encontrado entre as fibras deste tecido, proporcionando um fechamento dos poros.

Para as partículas de polvilho nos tecidos de poliéster tratado e não tratado, observou-se que a maior profundidade de deposição das partículas aconteceu no tecido de poliéster sem tratamento, mostrando que a ausência de tratamento permite que o tecido obtenha uma maior deposição de partículas no interior do meio filtrante, aumentando a resistência do fluxo e também a perda de carga residual do sistema. Isto mostra que tanto as características do meio filtrante e do material particulado exercem uma influência na profundidade de deposição das partículas e na perda de carga residual do sistema. Logo, o melhor desempenho encontrado utilizando os

materiais particulados de rocha fosfática e de polvilho doce, nestas condições experimentais foi o tecido de poliéster tratado.

Realizou-se também um estudo dos efeitos das variáveis operacionais na profundidade de deposição das partículas, utilizando um planejamento experimental de três níveis,  $3^k$  avaliando o efeito das variáveis, velocidade de filtração ( $V_f$ ) e tempo de filtração ( $t_f$ ). Notou-se através dos resultados que estas duas variáveis apresentaram influência na variável resposta, mas a variável que proporcionou um maior efeito significativo foi à velocidade de filtração. Logo quando se deseja obter menores níveis da profundidade de deposição das partículas, sugere-se a utilização de baixos valores de velocidades de filtração e baixos valores de tempos de filtração, porque o aumento da deposição das partículas no interior do meio filtrante dificulta o processo de limpeza, obstruindo a passagem do ar através do filtro, provocando assim um aumento na perda de carga residual do processo.

## ABSTRACT

Many studies related to bag filters have focused on minimizing the amount of energy used in the process. Seeking longer filtration cycles, lower frequency of cleaning cycles and a longer filter life, such studies search for fabrics which present easy cake removal and the least loss of residual pressure drop. There are many studies related to the formation and removal of filtration cakes but little is known about the behavior of particles deposited on the inside of the filter and what influence these particles have on the performance of filters. For this reason, the objective of this study was to investigate particle deposition behavior and particulate materials on the interior of different filter materials after the cleaning process and to evaluate the impact of these particles on the regeneration of the fabric under microscopic examination. Particulate materials utilized were phosphatic rock and manioc starch with filter mediums of treated polyester, untreated polyester, polypropylene and acrylic.

The filter trials were carried out at a filtration velocity of 0.10 m/s. The cake removal process was done by reverse airflow at a cleaning velocity of 0.12 m/s. The maximum pressure drop permitted in the filtration trials was 980 Pa.

Utilizing phosphatic rock and acrylic, polypropylene and treated polyester, the depth of particle deposition on the polypropylene fabric was less deep in relation to the other two fabrics studied. The residual pressure drop of this fabric was greater, demonstrating that the accumulation of particulate material in this filter medium provided a greater resistance to flow, due to the smaller spacing encountered between the fibers of this fabric and consequent closing of pores.

For the manioc starch particles on treated and untreated polyester, a greater depth of particle deposition was observed on the untreated polyester, showing that the absence of treatment allowed the fabric to obtain greater particle deposition on the interior of the filter medium, which increased the resistance to flow and the system residual pressure drop. This shows that the characteristics of the filter medium and the particulate material both exercise an influence on the depth of particle deposition and on residual pressure drop in the system. Thus, the best performance encountered utilizing particulate materials of phosphatic rock or manioc starch under the experimental conditions, was with the treated polyester.

A study on the effects of the operational variables on particle deposition depth was also conducted, utilizing a three level experimental plan,  $3^k$ , to evaluate the effect of the variables, filtration velocity ( $V_f$ ) and filtration time ( $t_f$ ). Results showed that both these variables presented an influence on the response variable, but the variable that produced the greatest significant effect was the filtration velocity. The utilization of lower values of velocity and lower values of filtration times is suggested to achieve lower levels of particle deposition depth, because the increase in particle deposition on the interior of the filter obstructs the air flow through the filter, thus slowing the cleaning process and provoking an increase in residual pressure drop.

## **1. INTRODUÇÃO**

Com a crescente preocupação com o aumento da poluição atmosférica, agravada principalmente pelo crescimento industrial desordenado e pela criação de legislações mais rigorosas, tornou-se necessário o desenvolvimento de novas técnicas e equipamentos para a limpeza dos gases.

Dentre os diversos processos de separação gás-sólido existentes, destaca-se a filtração, em que partículas em suspensão na corrente gasosa passa através de um meio filtrante formando as tortas de filtração. Na filtração gás-sólido, os filtros de tecido são atualmente bastante empregados, porque são economicamente viáveis, de fácil operação e altamente eficientes na remoção de partículas. Esses equipamentos, além de serem capazes de satisfazer as leis ambientais, são importantes na recuperação do material particulado, sendo este, o principal produto de algumas indústrias.

Apesar de serem equipamentos conhecidos e utilizados há muito tempo, os filtros manga voltaram a ser amplamente empregados nas indústrias após o desenvolvimento de novas fibras sintéticas, devido à ampliação na faixa de aplicação, principalmente sob condições críticas de operação, como temperaturas elevadas e situação de abrasão e de corrosão.

Durante os ensaios de filtração, um variável de grande importância no desempenho dos meios filtrantes é a perda de carga, que aumenta de acordo com a formação da torta de filtração. Quando esta perda de carga atinge um valor máximo, determinado por questões operacionais e econômicas, torna-se necessária a limpeza do filtro, de forma a manter a queda de pressão dentro dos limites práticos de operação.

Na operação de limpeza dos tecidos, o destacamento da torta de filtração ocorre em pedaços, denominada limpeza por blocos, no qual algumas partes da torta são completamente removidas e outras permanecem intactas no tecido. Isto conduz a um aumento da queda de pressão residual mesmo após a etapa de limpeza, resultando em ciclos mais curtos, ou seja, em uma frequência de limpeza maior durante os períodos de filtração.

Atualmente, existem muitas pesquisas direcionadas à formação e remoção das tortas de filtração, mas pouco se sabe sobre o comportamento das partículas depositadas no interior (colmatação) do meio filtrante após a limpeza. Entretanto, a excessiva deposição das partículas no interior do meio filtrante pode causar um grande aumento na perda de carga residual,

reduzindo o tempo de filtração e aumentando o número de regenerações com o decorrer dos ciclos. Logo, o conhecimento da deposição das partículas no tecido poderia esclarecer melhor as operações de filtração e de limpeza, visando minimizar o consumo energético e aumentar o tempo de vida útil dos tecidos.

Pensando nisso, alguns autores estão pesquisando este comportamento como:

- Martins (2001) estudou a estrutura e as propriedades inerentes ao meio filtrante na operação de filtração de aerossóis, utilizando o tecido de poliéster tratado e partículas de rocha fosfática. Os ensaios de filtração foram realizados para velocidades de 5 cm/s e 10 cm/s. O autor verificou que a profundidade de deposição de pó não foi homogênea para diferentes regiões do tecido, sendo que para a maior velocidade de filtração, a profundidade de deposição foi maior e que a permeabilidade do meio poroso diminuiu com o aumento da massa de pó residual.
- Rodrigues (2006) investigou a profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática em diferentes meios filtrantes. Os ensaios de filtração foram realizados a uma velocidade de 10 cm/s. Em seu trabalho foi constatado que, apesar da heterogeneidade do meio filtrante, houve um acúmulo de partículas nas camadas superficiais do tecido, que diminuía com a profundidade de deposição. O autor verificou também que, para o polipropileno, tecido com menor permeabilidade e porosidade, houve menor retenção de partículas após a limpeza. No entanto, esse meio filtrante foi o que apresentou maior perda de carga residual e ciclos de filtração mais curtos, fatos que foram associados às características do material e das partículas.
- Mauschitz et al.(2007) investigaram a deposição de partículas de carbonato de cálcio em feltros de poliéster suportados à uma profundidade de 2 mm por telas com aberturas de 250  $\mu\text{m}$  (FM14c) e 1200  $\mu\text{m}$  (FM14d). Os ensaios de filtração foram realizados a uma velocidade de 0,05 m/s e o método de limpeza aplicado foi o pulso de ar reverso. Os autores observaram que ocorreu um aumento na massa residual depositada dentro do meio filtrante e uma diminuição da porosidade superficial em determinadas profundidades do tecido com aumento no número de ciclos, sendo estas partículas depositadas inicialmente próximas à superfície externa do tecido. Verificaram também que o tecido FM14c apresentou uma maior perda de carga residual em relação ao tecido FM14d. As altas cargas de partículas alojadas dentro do meio filtrante FM14c, próximas das telas, ocasionaram o bloqueio da passagem do ar, aumentando a perda de carga residual do sistema. Isto mostrou que a grande quantidade de partículas depositadas no interior do filtro tornou-se prejudicial nos ensaios de filtração.

Dessa forma, a proposta deste trabalho foi investigar a deposição das partículas após a operação de remoção da torta de filtração, estudando o comportamento destas partículas no interior do meio filtrante, como a profundidade de deposição, a quantidade e o tamanho das partículas, avaliando os impactos proporcionados por estas partículas nas características da filtração, principalmente na perda de carga residual. Propôs-se também realizar um estudo para avaliar o efeito das variáveis operacionais, como velocidade superficial de filtração e o tempo de filtração, na profundidade de deposição das partículas utilizando um planejamento experimental.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos importantes utilizados em filtros mangas, principais variáveis de projeto, tipos de tecidos empregados, métodos de finalização do tecido, mecanismos de remoção das tortas, e também alguns estudos dos principais trabalhos encontrados na literatura.

O grande desenvolvimento industrial desperta cada vez mais o interesse na conservação do meio ambiente e na recuperação de matérias primas. Particularmente, a limpeza de gases recebe uma atenção especial de pesquisadores e fabricantes de filtros que buscam conhecer melhor o fenômeno da filtração e, conseqüentemente, desenvolver meios filtrantes e mecanismos de limpeza mais eficientes.

A escolha do equipamento de remoção de partículas depende de alguns fatores muito importantes que devem ser levados em consideração, tais como: o tamanho das partículas, a sua densidade e concentração, a vazão de gás, a sua temperatura e as características físicas e químicas.

Dentre os diversos tipos de equipamentos utilizados nos processos de separação gás-sólido, os filtros de mangas são os mais empregados, porque possuem alta eficiência para amplas faixas granulométricas, são facilmente operados, apresentam simples manutenção e possuem a capacidade de operar com altas cargas de pó e grandes volumes de gás (THEODORE E BUONICORE, 1998). Esses filtros podem ser utilizados em diversas aplicações, tais como: proteção respiratória, recuperação de particulados, em operações industriais, limpezas de ambientes, entre outros (HINDS, 1999).

O emprego dos filtros manga nas indústrias está se tornando cada vez maior, devido ao desenvolvimento de novas fibras sintéticas, que ampliaram o campo de utilização dos filtros de mangas em diversos processos, principalmente sob condições críticas de operação, com melhor resistência ao calor, a materiais corrosivos, entre outras características.

### **2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS TECIDOS DE FILTRAÇÃO**

Os tipos de tecidos utilizados em filtração industrial atualmente englobam uma variedade de materiais, incluindo tecidos trançados e tecidos não trançados, também denominados feltros,

que são confeccionados com diversas fibras. A classificação existente para as fibras comerciais é apresentada pela ABRAFAS – Associação Brasileira dos Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas. Os materiais de fabricação incluem as cerdas naturais e as sintéticas. As primeiras fibras a serem utilizadas foram as naturais, principalmente a lã e o algodão. Embora estas fibras possuam algumas limitações de suas propriedades físicas, elas são ainda empregadas em muitas aplicações de filtração (DONOVAN, 1985). As fibras sintéticas são atualmente as mais utilizadas e incluem acetatos, acrílicos, poliamidas, poliésteres, poliolefinas, entre outros materiais. Isto se deve ao baixo custo, a uma maior resistência química e física e a um menor diâmetro das fibras. Para altas temperaturas empregam-se filtros de teflon e algumas fibras de carbono foram desenvolvidas para esta aplicação. No entanto, o material sintético mais empregado é a fibra de vidro (MARTINS, 2001).

A fibra de poliéster, por exemplo, tem uma baixa resistência ao calor úmido, o que leva a uma redução na sua durabilidade. Barnett (2000) realizou um ensaio para testar a fibra de poliéster a uma umidade relativa de 10% e operando a uma temperatura de 140°C. A fibra de poliéster resultou numa redução de 12% na durabilidade depois de sete dias de operação.

Em 1991, a temperatura máxima para um filtro disponível comercialmente era de cerca de 260°C. E este fato mudou com o advento dos filtros cerâmicos e metálicos (DAVIS e BUONICORE 1992).

Para uma melhor compreensão da estrutura de um tecido, cabe definir a seguir alguns outros termos e classificações relativas à sua fabricação (RODRIGUES 2006):

*Fibras*: são as componentes básicas do fio. O fio pode ser confeccionado com materiais sintéticos ou naturais, e ser constituído por fibras curtas (segmentadas), que são denominadas fibras cortadas ou “*staple*”, ou por filamentos, que é uma fibra contínua (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

*Fios*: a fiação transforma as fibras em fios por um processo em que as mesmas são “torcidas” em fios, sendo esta torcida medida pelo número de voltas por polegada. Quanto mais torcido o fio, mais forte este será, até certo ponto limitante (DONOVAN, 1985). De acordo com Cheremisinoff e Young (1977), para fios formados por filamentos é considerado ótimo seis voltas por polegada e para fibras cortadas de 10 a 20 voltas. Ultrapassados estes valores, o fio perde elasticidade e torna-se quebradiço.

As propriedades de resistência lateral e longitudinal dos tecidos podem ser atribuídas, pelo menos em parte, às combinações de torcidas à esquerda ou à direita, denominadas torcidas “S” e “Z”, respectivamente, como ilustra a Figura 2.1.

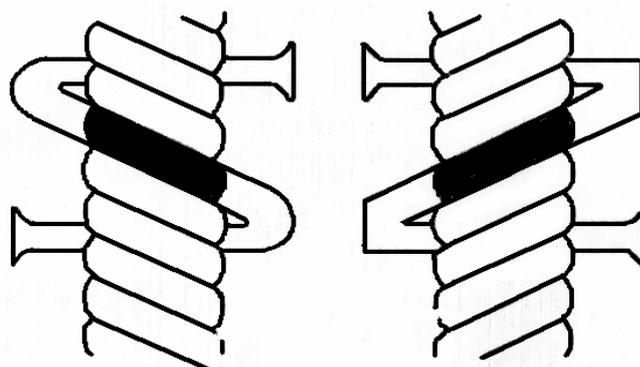


Figura 2.1: Tipos de torcidas utilizadas na confecção de fios.  
Fonte: BILLINGS e WILDER (1970)

*Padronização:* Apesar da existência de vários parâmetros de caracterização dos tecidos, a indústria têxtil padronizou sistemas mais convenientes, como o Tex e o Denier. O número Tex é definido pela massa em gramas de um quilômetro de fio. Multiplicando este valor por 9 obtém-se o número em Denier (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

Os fios formados por fibras sintéticas, para fabricação de tecidos trançados, podem se apresentar em três configurações: o monofilamento, formado pela extrusão de um filamento de fibra contínua, após a solidificação; o fio multifilamentoso, formado quando várias fibras são torcidas juntas, assim que se solidificam, apresenta maior flexibilidade quando comparado ao monofilamento, maior espessura e pode ser trançado em estruturas mais justas; os fios estirados (“spun”) são formados por fibras sintéticas cortadas em partes curtas (40-70 mm) e processadas (ou cardadas) como as fibras cortadas naturais (DONOVAN, 1985). Os tecidos trançados desta forma são mais volumosos, mais rígidos, e têm maior capacidade de coleta. As desvantagens englobam a baixa resistência ao estiramento e dificuldades na limpeza da torta. Uma representação destes tipos de fios pode ser vista na Figura 2.2.

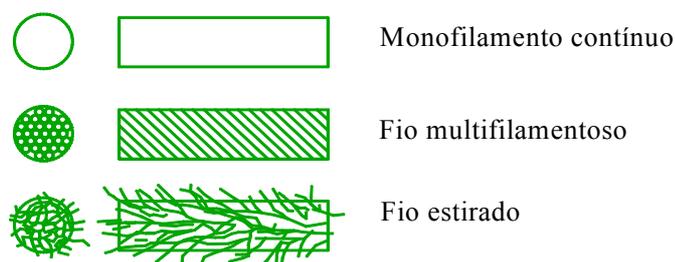


Figura 2.2: Tipos de confecção de fios sintéticos.  
Fonte: DONOVAN, 1985

A seguir serão apresentadas as formas de confecção dos tecidos.

### 2.1.1 Tecidos Trançados

A maior parte dos tecidos utilizados na filtração de gases é confeccionada completamente ou parcialmente por trançamento das fibras. O filtro de manga no qual o gás flui de dentro das mangas para fora, usam tecidos trançados quase que exclusivamente (MYCOCK et al,1995). Exemplos seriam filtro de mangas com sistema de limpeza por fluxo de ar reverso e vibração mecânica. Os filtros de tecido trançado oferecem baixa resistência ao fluxo de gás e seu acabamento macio confere boa característica de liberação da torta de filtração (TOGNETTI, 2007).

Conforme a ABNT/TB-392, um tecido trançado é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama formando um ângulo de (ou próximo de) 90°. O conjunto de fios que correm longitudinalmente em um pano é chamado de urdume que forma a estrutura básica do tecido trançado, que deverá suportar o tecimento. O fio que é entrelaçado com o urdume é perpendicular a este, é designado trama, formando-se assim o tecido trançado.

Os tecidos podem ser trançados de várias formas. O trançado plano é a forma mais simples, com cada fio da trama passando acima e abaixo do urdume. O tecido trançado sarja é um segundo tipo de tecido, formado pelo entrelaçamento de mais de um e menos de quatro fios longitudinais em seqüência do fio transversal. Ao fim de cada linha sucessiva, o padrão é mudado em um passo para a direita ou à esquerda. Este tipo de trançado fornece um tecido mais resistente e mais flexível que o trançado plano.

O terceiro tipo de trançado é o de cetim, no qual mais de quatro fios longitudinais são entrelaçados por vez. Este tipo de trançado promove um acabamento acetinado ao tecido, mas não confere boa resistência como os outros trançados. Tais tecidos podem aparecer em duas variedades, sendo uma a face de fios longitudinais e a outra a de fios transversais, dependendo de qual fio aparece na superfície. Na Figura 2.3 estão apresentados os tipos de entrelaçamento.

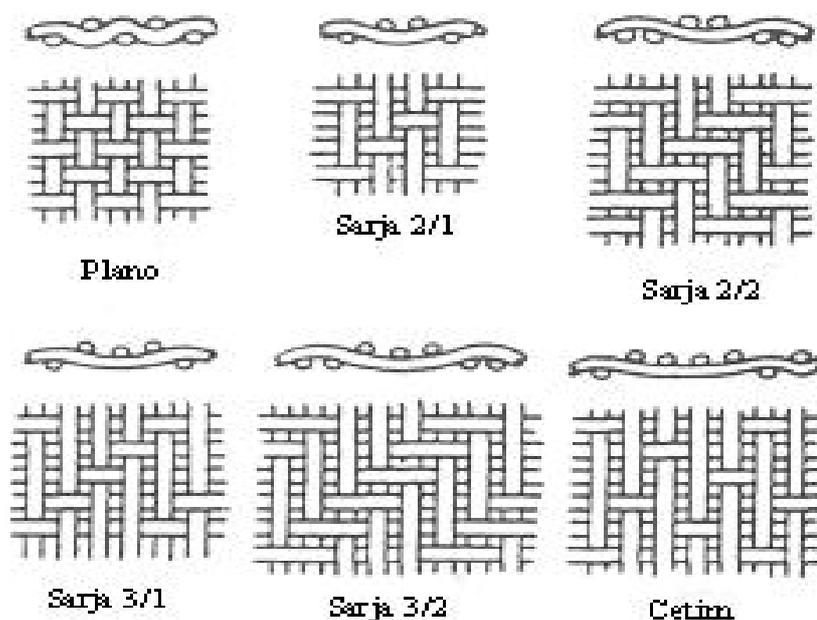


Figura 2.3: Tipos de tecidos trançados (BUONICORE&DAVIS, 1992).

### 2.1.2 Tecidos não trançados ou feltros

Um tecido não trançado é formado por uma estrutura plana, flexível e porosa, constituído de um véu ou manta de fios em que as fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso e consolidado por vias mecânicas, químicas ou térmicas. Os tecidos não trançados ou feltros são mais apropriados para filtros manga com sistema de limpeza por jato pulsante que oferece alta energia para limpeza e alto fluxo operacional de gás. Filtros não trançados trabalham bem com pós mais pesados como areia seca, pedra calcária, e grãos. Em geral os tecidos não trançados possuem vida útil mais longa das mangas, mas oferecem maior resistência ao fluxo do que os tecidos trançados (MYCOCK et.al, 1995).

A fabricação dos feltros se inicia pela formação de uma manta, constituída por uma ou mais camadas de véus. Estes véus são obtidos por processos de cardagem, por fluxo de ar, por deposição eletrostática, por suspensão em meio líquido ou por fiação direta de filamentos contínuos. Em seguida, a manta é consolidada por processos químicos, utilizando resina, secagem e polimerização; por meios mecânicos, usando agulhas que entrelaçam as fibras, costuras ou jatos de água; ou físicos, utilizando calor e pressão. Pelo próprio processo de produção, os feltros exibem muito mais poros por unidade de área que os tecidos trançados (HARDMAN, 2001).

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

A fabricação dos feltros poliméricos pode ser classificada em três categorias básicas, conforme o processo de manufatura da rede inicial (véu) que constitui o tecido:

1. Processo a seco: a rede é formada por um processo de cardagem, que separa, alinha e libera as fibras como uma rede para a posterior etapa de ligação.
2. Processo a úmido: semelhante ao processo de fabricação do papel, onde as fibras são dispersas em meio líquido, e alimentadas em uma esteira aquecida que seca as fibras.
3. Processo de ligação dos fios: é um processo que, que diferentes dos outros dois, envolve desde a produção do polímero até a finalização do tecido em si. Os produtos de entrada não são as fibras, mas sim o predecessor, o polímero fundido. Este é extrudado e em seguida, as fibras assim formadas são orientadas durante a queda em uma esteira. A seguir, a rede formada passa pela etapa de ligação, que pode ser térmica, química, ou por pressão (DONOVAN, 1985).

A técnica da agulhagem é um método mecânico de ligação da rede formada, que consiste em combinar duas ou mais camadas de fibras em um feltro produzido pelas técnicas apresentadas nos itens 1 e 2, ou naturais, e atravessá-las com agulhas farpadas. Este processo visa distribuir as fibras uniformemente pela matriz trançada (CLARK, 2001). Algumas modificações na estrutura básica produzida no processo de perfuramento 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 (BAKER, 2001).

Theodore e Buonicore (1998) afirmam que os feltros limpos são mais eficientes que tecidos trançados limpos, mas que estes últimos são capazes de alcançar eficiências comparáveis após uma camada de partículas ter se acumulado em sua superfície. Na indústria, este processo de formação da torta pode durar, dependendo da carga e da natureza das partículas, desde algumas horas até alguns dias. Por esse motivo, no caso dos tecidos trançados, deve-se cuidar para que a limpeza não elimine completamente a camada superficial da torta, o que diminuiria a eficiência da filtração. Como afirmam os autores, este problema é mais difícil de ocorrer nos feltros pela grande quantidade de partículas retidas no interior do tecido após a limpeza. Assim, os feltros necessitariam de técnicas de limpeza mais rigorosas, empregando frequentemente métodos de pulso de ar.

A Figura 2.4 mostra alguns exemplos de tecidos trançados e feltro.

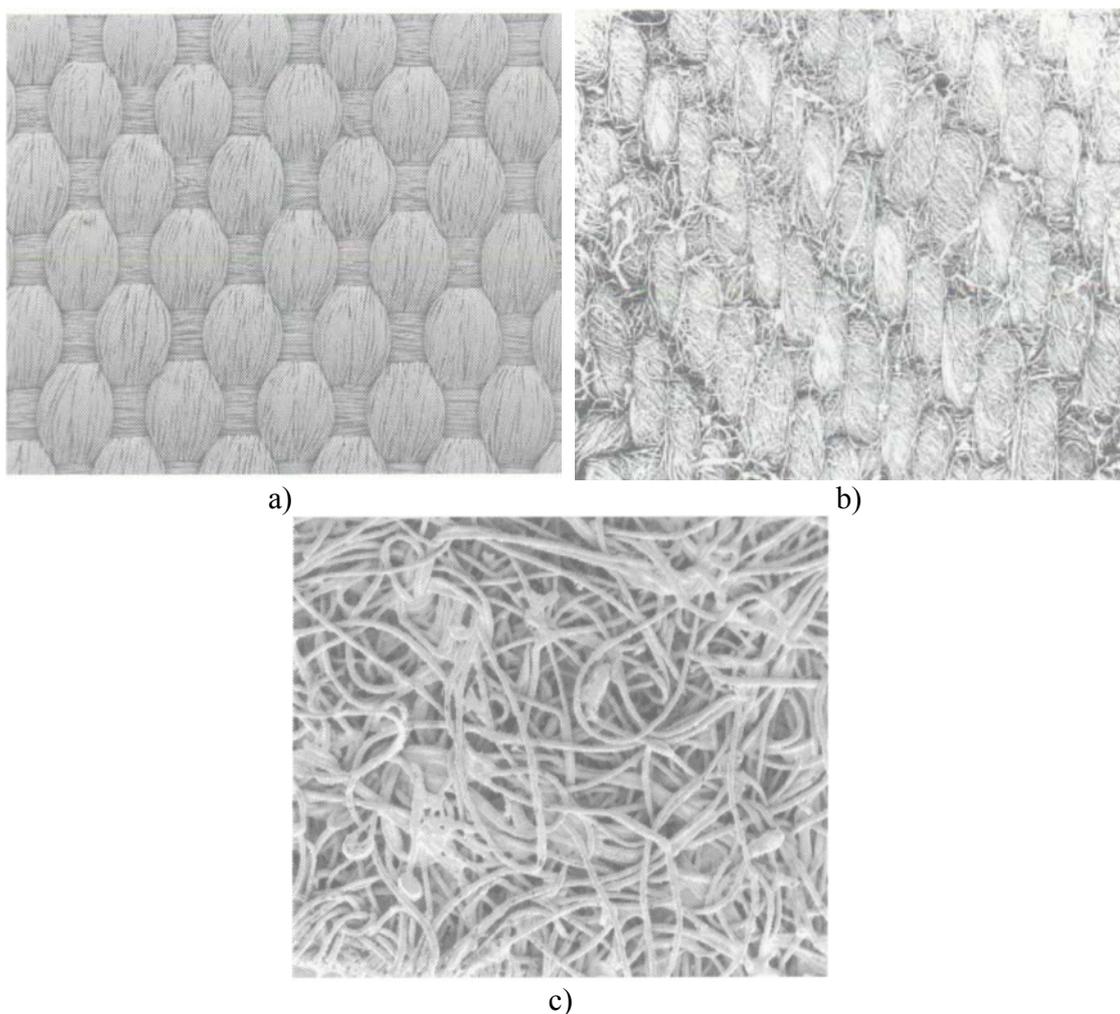


Figura 2.4: Tipos de tecidos: a) trançado:trama plana; b) trançado:trama sarja 2/1; c) feltro agulhado.

## 2.2 MÉTODOS DE TRATAMENTOS DE TECIDOS OU FINALIZAÇÃO

Existem várias formas de tratamento de tecidos, dentre eles os mecânicos, térmicos e químicos para melhorar a performance dos meios filtrantes utilizados no processo de filtração (DONOVAN, 1985).

Dentre os motivos que estimulam a realização de tratamentos finalizadores estão: (i) assegurar a estabilidade adequada ao tecido (contra o encolhimento, por exemplo), (ii) modificar as características superficiais, alterando inclusive a capacidade de liberação da torta, (iii) regular a permeabilidade do tecido e conseqüentemente a capacidade de coleta (HARDMAN, 2001), e (iv) minimizar a penetração das partículas e diminuição da colmatação do tecido ( MAUSCHITZ et al., 2005). Entre os processos pode-se citar:

Calandragem: Processo utilizado para tecidos não trançados, onde o tecido passa através de rolos quentes que o comprimem uma ou mais vezes, agindo como o compactador fundindo a superfície das fibras. Na calandragem a quente, a temperatura é uma variável do processo.

Escovação: Nesta operação, uma vigorosa escovação da superfície resulta no levantamento dos fios do tecido. Esta técnica é aplicada em tecidos trançados, onde a eficiência inicial de coleta é baixa (ROTHWELL, 1989).

Chamuscagem: Este processo utiliza uma chama para eliminar fibras preponderantes da superfície, como se fosse um processo inverso à escovação. Este processo evita que as fibras da superfície sejam incorporadas à torta e formem uma espécie de “armadilha”, dificultando a limpeza.

Impregnação química: Consiste na imersão do tecido em banho químico. Este processo é utilizado para melhorar a performance do filtro, reduzindo o ataque químico, aumentando a resistência aos ácidos, facilitando a liberação da torta e retardando a propagação da chama (CLARK, 2001).

Alguns meios filtrantes podem receber tratamento antiestático, tratamento de orientação das fibras, recobrimento com membranas, receber resinagem com PTFE, ou ainda, ser plastificado em um ou ambos os lados, além de muitos outros tipos de tratamento disponíveis (LORA, 2002).

Na Tabela 2.1 estão apresentados alguns tipos de aplicações dos tipos de tecidos utilizados nos processos de filtração.

Tabela 2.1: Algumas aplicações dos tecidos utilizados para filtração (Renner Têxtil Ltda, 2001).

TIPO	MARCA	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
PP (polipropileno)	Polipropileno Meraklon	Indústria alimentícia (leite, açúcar, farinha), de detergente (condições de temperatura abaixo de 100° C)
AC (Poliacrilonitrila copolímero)	Acrílico	Secadores por atomização, Indústria calcárea, gesso (condições úmidas até 120°C)
DT (Poliacrilonitrila Homopolímero)	Dolanit Ricern Dralon T	Secadores por atomização, Indústria calcárea, gesso (condições úmidas até 125°C)
RO (Olefina resistente à alta temperatura)	Trol	Calcinação, filtração líquida, condições de extrema umidade e temperatura.
PE (Poliéster )	Poliéster	Mineração, cimento, siderúrgicas, madeiras, cerâmicas, asbestos, britagem, plástico, pigmentos (condições secas até 150° C)
NO (Poliamida aromática)	Nomex Conex	Asfalto, siderúrgicas, indústrias de cimento e cal, fundições, indústria de cerâmica.
RY (Polifenilsulfeto)	Ryton Procon	Caldeiras a carvão (em leito fluidizado) e indústria química (aplicações em campos com ataque químico e hidrólise acentuados)
PI (Polimida aromática)	P-84	Asfalto, siderúrgicas, indústrias de cimento e cal, fundições, indústrias cerâmica.
TF ou PR ( Teflon ou politetrafluoretileno)	Teflon profilen	Negro de fumo, incineradores de lixo, caldeiras a carvão (condições extremas de ataques químicos e temperatura)

A seleção adequada dos tecidos a serem utilizados como meio filtrante, 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, à energia de absorção, as propriedades da filtração, a resistência aos álcalis, aos ácidos, ao oxigênio e o custo relativo do material (BARNETT, 2000).

Na Tabela 2.2 estão apresentadas as propriedades gerais de algumas fibras.

Tabela 2.2: Propriedades gerais das fibras dos tecidos (DONAVAN, 1985).

FIBRA	Algodão	Lã	Polipropileno	Poliamida	Acrílico	Poliéster	Aramida aromática	Vidro	Metal
<b>SIGLA DIN 60001</b>	CO	WO	PP	PA	PAC	PES	PAI	GL	MT
<b>MARCAS</b>	-	-	Courlene Hostalen Meraklon Pylon	Nailon Nylon6.6 Perlon Rilsan	Crylon Drylon T Orlon Redon Ricem	Dracon Tergal Terital Terylene Trevira	Nomex Tejin Conex	Fiberglass Vetrolon Vetrotex	Bekinox
<b>Teor de umidade absorvida pela fibra, base seca(%), 65%U.R. e 21°C</b>	8	14,5	0,01	4,00	1,50	0,50	4,50	0,00	0,00
<b>Temperatura máxima de trabalho contínuo em °C</b>	90	94	90	110	120	150 (Calor Seco)	200	260	550
<b>Resistência ao calor úmido (hidrólise)</b>	Regular	Fraca	Excelente	Não resiste	Boa	Não resiste	Não Resiste	Boa	Boa
<b>Resistência a abrasão</b>	Regular	Regular	Boa	Excelente	Boa	Excelente	Excelente	Fraca	Regular
<b>Resistência aos ácidos minerais</b>	Fraca	Boa	Excelente	Fraca	Boa	Não resiste	Não resiste	Boa	Boa
<b>Resistência aos ácidos orgânicos</b>	Fraca	Boa	Excelente	Fraca	Boa	Fraca	Fraca	Boa	Boa
<b>Resistência aos álcalis</b>	Boa	Fraca	Excelente	Boa	Fraca	Fraca	Boa	Fraca	Excelente
<b>Resistência aos agentes oxidantes</b>	Fraca	Fraca	Fraca	Fraca	Boa	Boa	Fraca	Excelente	Excelente
<b>Resistência aos solventes orgânicos</b>	Excelente	Excelente	Excelente	Boa	Excelente	Boa	Excelente	Boa	Excelente
<b>Densidade específica</b>	1,50	1,31	0,90	1,14	1,16	1,38	1,37 a 1,38	2,54	7,9
<b>Ácidos(em alta concentração) que a fibra não resiste</b>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HNO <sub>3</sub> HCOOH HCl	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	HF	Sem Análise
<b>Propagação da Combustão</b>	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não

Diferentemente do mecanismo de ação de uma peneira, em que apenas as partículas com diâmetros superiores à abertura da malha ficam retidas (HINDS, 1999), os filtros de tecido possuem elevada eficiência de coleta para uma ampla distribuição granulométrica. Apesar da abertura dos poros dos tecidos comerciais utilizados como meio filtrante serem de

aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ , estes removem adequadamente partículas menores que 0,5  $\mu\text{m}$  e coletam uma quantidade substancial de partículas menores que 0,01  $\mu\text{m}$  (THEODORE e BUONICORE, 1988).

Segundo ROSS (1972), a captura de partículas de diâmetros inferiores às aberturas dos poros dos tecidos se deve, a mecanismos como a impactação de partículas grandes com as fibras; a difusão de partículas submicrômicas pelas fibras; a atração e repulsão eletrostática e a retenção das partículas grossas pelo tecido e das finas pela torta formada, este último sendo o mecanismo que se assemelha ao peneiramento. Os principais mecanismos serão ilustrados na seção 2.3.

### 2.3 MECANISMO DE CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO

A corrente de gás passando através de um filtro carrega as partículas em direção aos corpos coletores, que no caso dos filtros de tecidos, são as fibras. Para que ocorra a filtração, é necessário que haja contato físico entre partícula e coletor. Além disso, é necessário que a partícula fique retida no coletor. Durante o escoamento do gás carregado de partículas, este é forçado a passar através de um meio contendo os coletores (fibras), e essa coleta se dá através de vários mecanismos (COURY, 1986), que serão apresentados a seguir:

Interceptação Direta: Ocorre quando uma partícula segue o fluxo de gás entre as fibras do tecido. Tais partículas possuem um raio significativamente maior que o espaçamento entre as fibras, assim as partículas batem na fibra no qual são capturadas. Na interceptação direta, como mostra a Figura 2.5, as partículas seguem o fluxo da linha original (KIM et al, 2000).

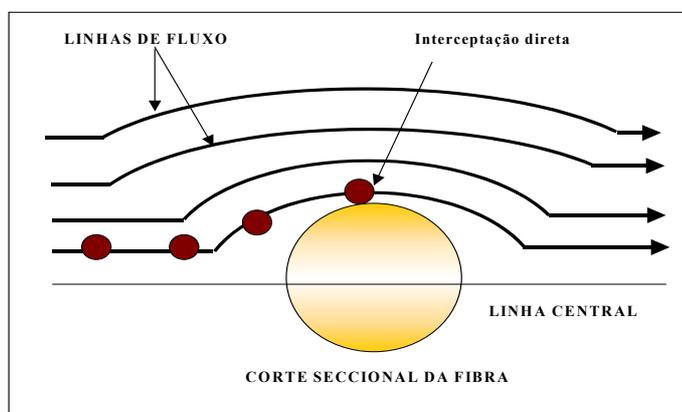


Figura 2.5: Mecanismo de captura por interceptação direta.

Difusão ou movimento Browniano: Este mecanismo funciona bem para partículas submicrômicas ( $0,01\mu\text{m}$ ) e baixas velocidades de filtração. Quanto menor o tamanho da partícula melhor este mecanismo trabalha, devido à difusão ou ao movimento Browniano. Neste caso, as partículas são tão pequenas e têm tão pouca massa que podem ser influenciadas pelo bombardeamento de moléculas de gás ao redor da partícula que afeta o caminho até colidir na fibra (BILLINGS e WILDER,1970). Na Figura 2.6 está ilustrado o mecanismo de difusão ou movimento Browniano.

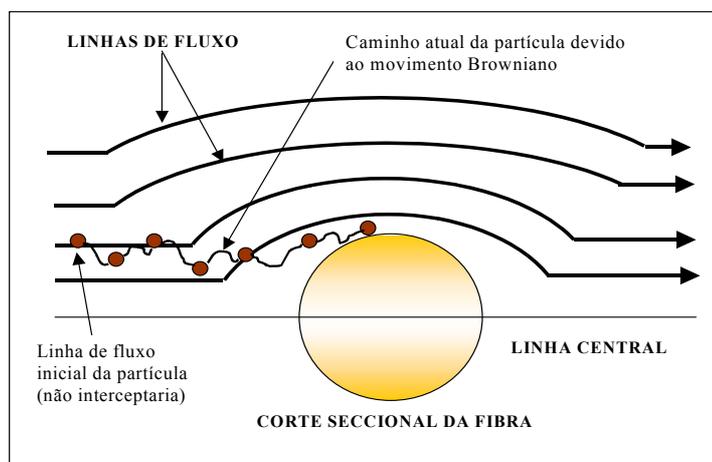


Figura 2.6: Mecanismo de captura por difusão ou movimento Browniano.

Impactação inercial: Neste caso, admite-se que as partículas possuem massa finita. A presença de um corpo no caminho do escoamento produz uma curvatura nas linhas de corrente, seja ele uma fibra ou uma esfera. As partículas são projetadas de suas linhas de corrente originais por ação inercial e se chocam com o corpo coletor, podendo ou não se depositar em sua superfície. Neste mecanismo é evidente a influência da velocidade e da massa das partículas (DULLIEN, 1989). Na Figura 2.7 está ilustrado o mecanismo de impactação inercial.

Gravidade ou sedimentação: Este mecanismo é o resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, que causa um desvio da trajetória normal. É o mecanismo dominante para baixas velocidades de gás e grandes partículas. A eficiência depende da direção do fluxo, ou seja, a eficiência é maior quando o fluxo ocorre de cima para baixo do que de baixo para cima (AGUIAR,1991). Na Figura 2.8 está ilustrado o mecanismo de gravidade.

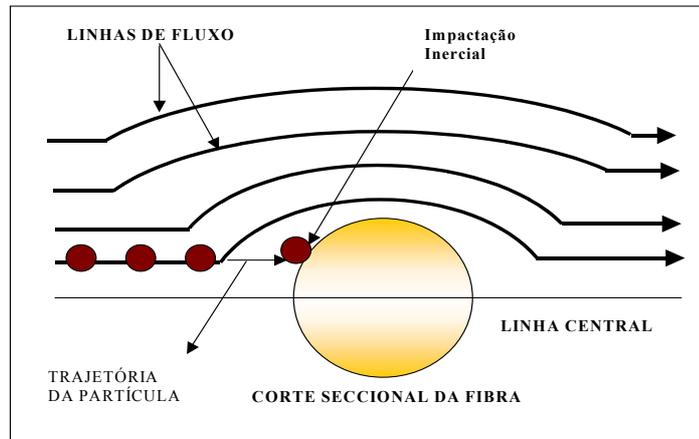


Figura 2.7: Mecanismo de captura por impactação inercial.

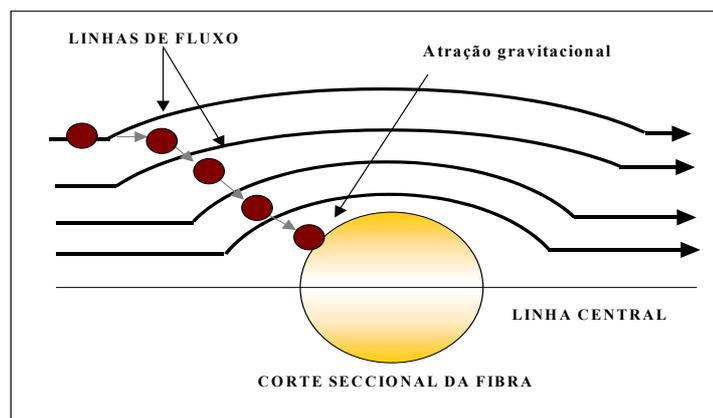


Figura 2.8: Mecanismo de captura por gravidade.

Forças eletrostáticas: Além dos mecanismos denominados mecanismos mecânicos, vários estudos mostram que as forças eletrostáticas podem ser de grande importância na operação de filtração. Tais forças podem proporcionar aumento na eficiência da filtração, e no caso de existência da torta, causar a formação de tortas menos compactas, que oferecem menos resistência ao escoamento do gás. A presença de forças elétricas num filtro pode ser devida a cargas eletrostáticas nas partículas e/ou coletores ou pode ser induzida por um campo elétrico externo. (COURY, 1986).

Os principais mecanismos em que se dá a coleta são a atração entre as partículas carregadas e coletor carregado, com carga oposta (Coulômbico) e a atração entre partícula carregada e dipolo induzido do coletor globalmente neutro (Dipolo-imagem) (AGUIAR, 1991). Na Figura 2.9 estão

ilustrados os mecanismos de coleta eletrostática onde existe uma partícula carregada e o coletor carregado com carga oposta.

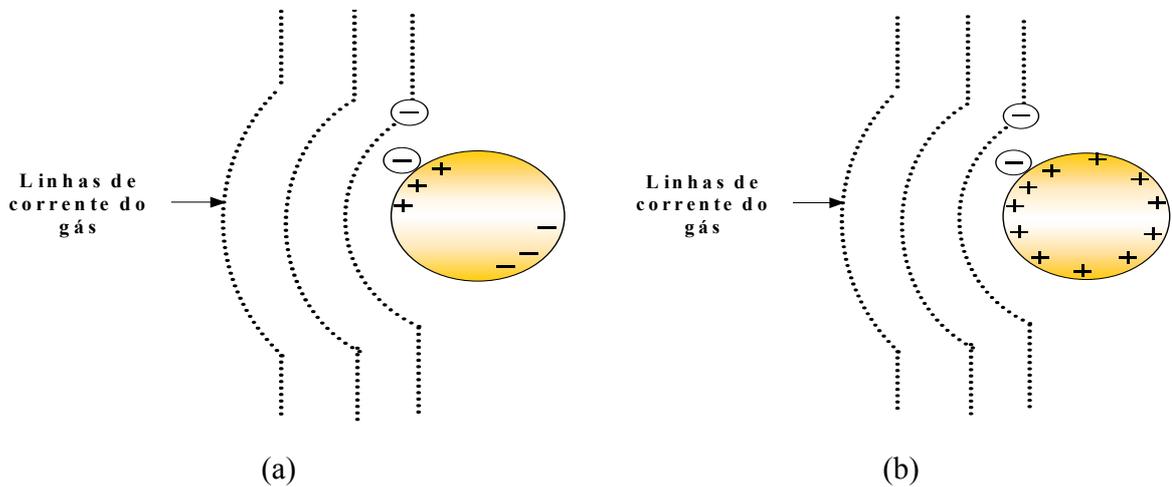


Figura 2.9: Mecanismo de coleta eletrostática: (a) Coulômbico e (b) Dipolo Imagem.

## 2.4 FORMAÇÃO DAS TORTAS DE FILTRAÇÃO

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

Na filtração de profundidade, em princípio, as partículas penetram intensamente no interior do tecido, ficando retidas nos interstícios das fibras, como ilustra a Figura 2.10. A captura pode ocorrer por ação dos mecanismos de captura como gravidade, inércia, interceptação direta e difusionais (THEODORE e BUONICORE, 1998).



Figura 2.10: Ilustração da Filtração de profundidade (Renner Têxtil Ltda, 2001).

Com o transcorrer da filtração e conseqüente aumento das partículas coletadas, inicia-se a etapa de transição, com a formação de dendritos, ilustrada na Figura 2.11. Estes dendritos são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante, que passam agir como novos elementos coletores (RODRIGUES, 2006).

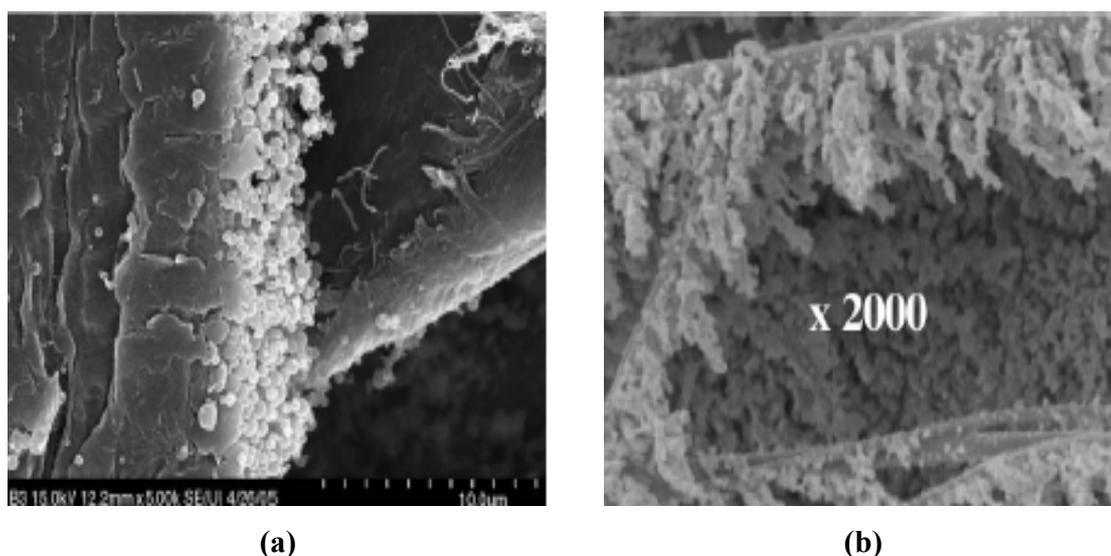


Figura 2.11: Fotografias com a formação de dendritos no tecido obtido por (a) Song et.al, 2006 e (b) Thomas et.al, 2001

Payatakes (1977) subdivide esta fase intermediária em duas, sendo que inicialmente ocorre a deposição de partículas sobre partículas, e segue-se a fase em que estes dendritos crescem e interagem com seus vizinhos, formando uma cobertura de espessura não uniforme ao redor da fibra, o que o autor denomina de matriz porosa interna.

Como resultado da formação destas estruturas, tem-se o acréscimo na taxa de queda de pressão e significativa diminuição da penetração das partículas através do filtro. Os dendritos formados vêm a constituir, finalmente, uma camada superficial de material particulado, denominado de torta de filtração ilustrada pela Figura 2.12.

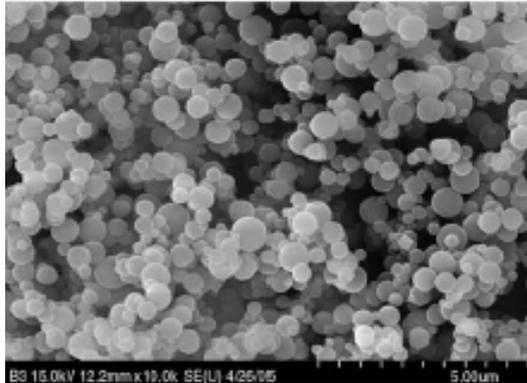


Figura 2.12: Formação da torta de filtração (SONG et.al, 2006).

A partir da existência da torta na superfície do tecido, tem-se a terceira fase da filtração. Esta fase é conhecida como filtração superficial, ilustrada na Figura 2.13, no qual o meio filtrante passa a atuar como suporte para a torta, sendo esta capaz de remover as partículas mais finas da corrente gasosa por peneiramento, ou por outros mecanismos de captura já descritos anteriormente. Desta forma, é interessante que se estabeleça a filtração superficial o quanto antes, para que o sistema alcance maior eficiência de remoção (RODRIGUES, 2006).

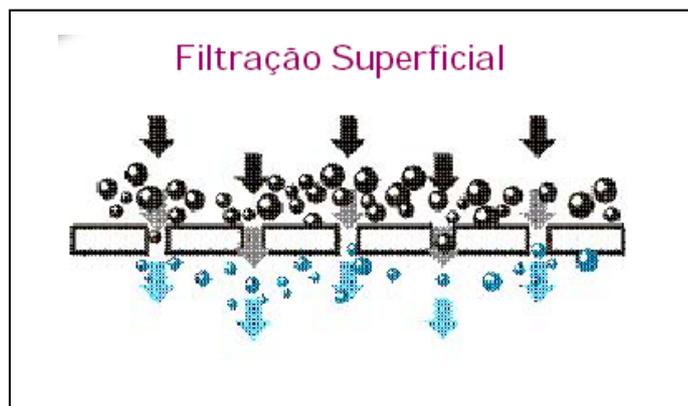


Figura 2.13: Ilustração da Filtração de Superfície (Renner Têxtil Ltda, 2001).

A previsão do momento exato de formação de torta é difícil de se obter fisicamente, mesmo porque os tecidos não são materiais uniformes. Vários autores admitem um valor experimental para demarcar o ponto em que a torta se forma, designado por ponto de colmatação.

Este ponto pode ser entendido também como sendo a capacidade de retenção do meio (JAPUNTICH et al., 1994).

Segundo Walsh (1996), o ponto de colmatação é dado pelo lugar geométrico obtido pelo gráfico de perda de carga em função da carga mássica, correspondente ao cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas, como apresentado pela Figura 2.14. Assim se obtém a massa de material particulado necessária para formar a torta.

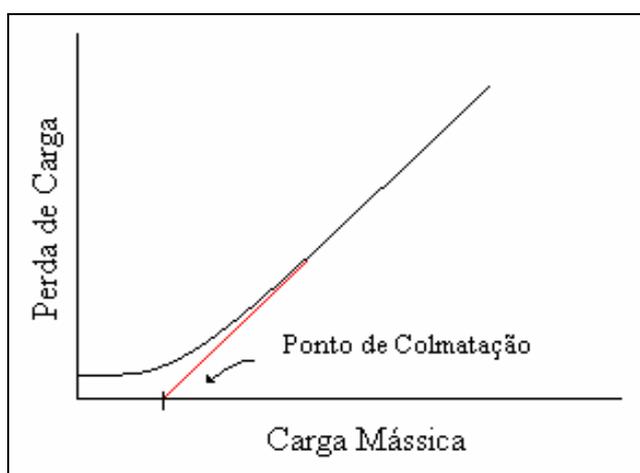


Figura 2.14: Determinação do ponto de colmatação do meio, conforme Walsh (1996).

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

Kanaoka e Hiragi (1990) verificaram um crescimento mais acelerado dos dendritos que antecedem a formação da torta nos casos em que prevalece a captura de partículas pelo mecanismo de difusão, sendo este crescimento mais moderado na faixa de coleta da interceptação direta e mais lento quando a coleta se dava no regime inercial. Estas informações foram ratificadas no trabalho de Japuntich et al. (1997) que comentaram que, no caso dos filtros de papel, este ponto é função do mecanismo de coleta que rege o processo e sugeriram que, para um dado mecanismo, este ponto é proporcional ao diâmetro do poro.

Durante a filtração gasosa, a curva de filtração, representada pela perda de carga no filtro em função do tempo, pode apresentar três comportamentos distintos: côncava para baixo, côncava para cima e linear, como pode ser observado na Figura 2.15.

Segundo Dennis (1982), a curvatura com concavidade para baixo é a mais comum, sendo que a deposição das partículas ocorre inicialmente no interior do meio filtrante. O comportamento linear é também possível, representando uma deposição na superfície estritamente uniforme em série com o tecido, ou seja, a não penetração de pó no tecido. A curva com concavidade para cima ocorre quando a torta já foi formada e removida parcialmente conhecido como fenômeno de Patchy Cleaning.

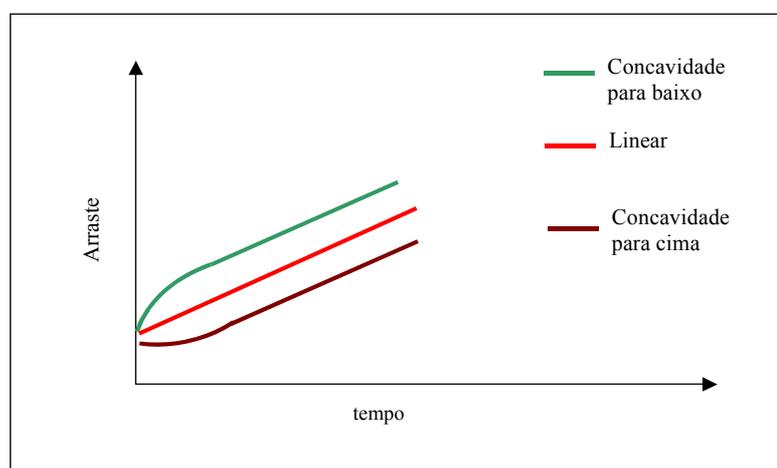


Figura 2.15: Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração.

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

## 2.5 CICLOS DE FILTRAÇÃO

Nesse seção serão apresentados os comportamentos de ciclos de filtração ideais, reais e reais com regeneração incompleta, segundo a Comissão Alemã de Preservação do Ar (Norma VDI3926, 2003).

Conforme ilustrado na Figura 2.16, no comportamento de funcionamento descrito como “ideal” a perda de carga segue como função linear com o tempo durante um ciclo de filtração.

O comportamento ideal de ciclos de filtração considera uma compactação imperturbada de material particulado no filtro, com fluxos de volume e concentrações de pó constantes e limpezas uniformes do meio filtrante, levando a ciclos uniformes, com o mesmo tempo de filtração que o primeiro ciclo, quando o filtro está limpo e novo, fato que não é observado na prática. Neste caso, o aumento da perda de carga residual se deve a incorporação irreversível de partículas no interior do meio filtrante ou pela permanência de uma fina camada de pó, com espessura uniforme, após a regeneração do meio filtrante (Norma VDI3926, 2003).

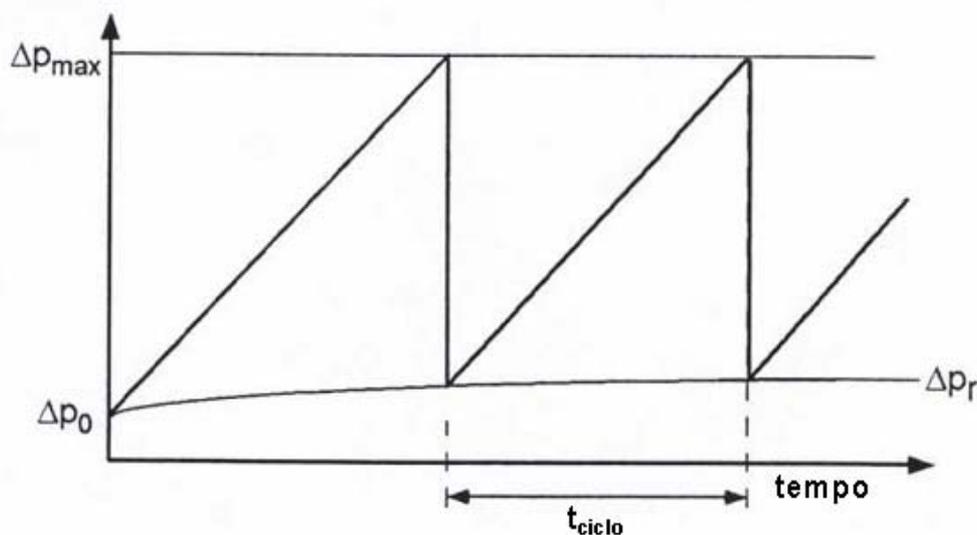


Figura 2.16: Ciclos de filtração ideais (Norma VDI3926, 2003).

O comportamento real dos ciclos de filtração pode ser visualizado na Figura 2.17. Nota-se que o tempo de filtração reduz muito em comparação com a Figura 2.16 e as curvas de filtração não possuem o comportamento linear nos primeiros ciclos. Isto se deve à compressão da torta de pó formada resultando em um tempo de filtração bem menor comparado com o comportamento ideal (VDI 3926, 2003).

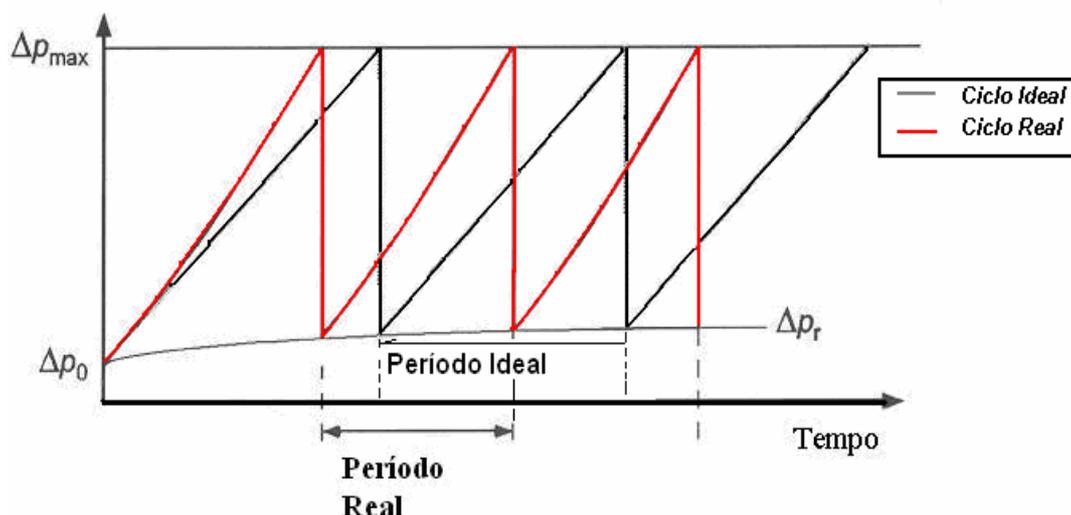


Figura 2.17: Ciclos de filtração reais (Norma VDI3926, 2003).

As partículas aderem ao meio filtrante através da passagem do ar sujo pelo meio filtrante e as partículas seguintes se sobrepõem umas sobre as outras, comprimindo dessa forma a torta. Durante a compressão da torta, a porosidade é reduzida aumentando a resistência à passagem da corrente de gás. Essa compressão da torta foi verificada no trabalho de Aguiar (1995) e de Ito (2002).

De acordo com a Norma VDI3926, são necessários no mínimo 100 ciclos de filtração para chegar ao comportamento estável, sendo em muitos casos, necessários mais de 1000 ciclos de filtração, dependendo da carga de pó. A estabilidade da queda de pressão residual, também pode ser determinada contando o número de ciclos de mesma duração e verificando o valor constante da queda de pressão residual, durante os ciclos. É preciso um certo cuidado em afirmar a estabilidade, porque podem ser percebidas alterações após grandes quantidades de ciclos. Quando se têm essas alterações nos ciclos, elas podem ser notadas em um tempo de 5 segundos (Norma VDI3926, 2003).

Após o primeiro ciclo de filtração, a torta de pó é removida incompletamente, ou seja, permanecem partículas na superfície do meio filtrante, reduzindo a efetividade da filtração. A remoção parcial da torta de pó é também conhecida como “Patchy Cleaning” (limpeza por blocos). Em caso de vazão volumétrica constante, a velocidade do ciclo aumenta formando mais rapidamente a mesma quantidade de torta de pó levando a diminuição do tempo de filtração. A

diminuição do tempo de filtração faz com que a curva de filtração fique convexa, como pode ser verificado na Figura 2.18 (Norma VDI3926, 2003).

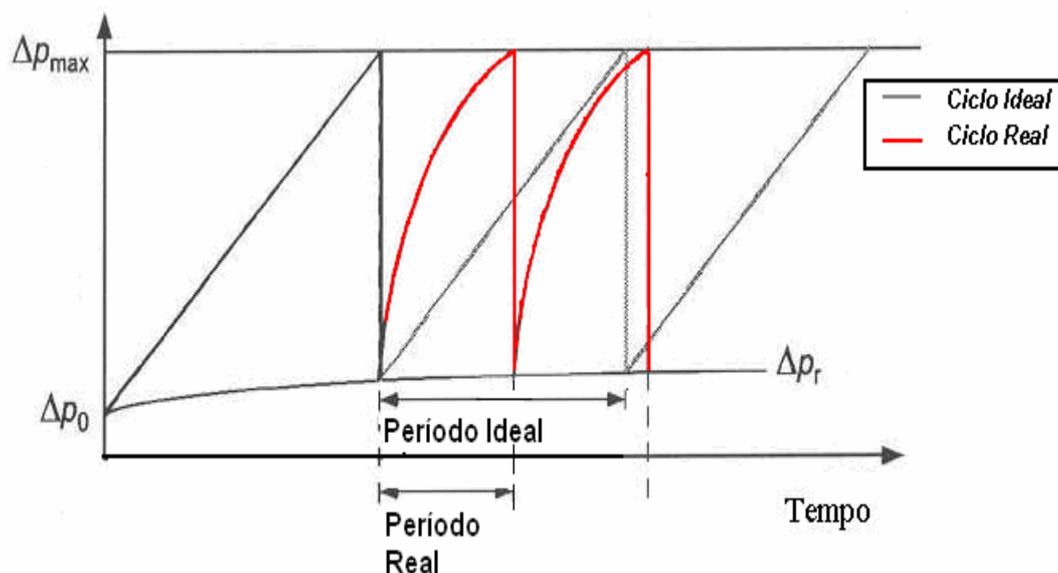


Figura 2.18: Ciclos de filtração reais, com comportamento de limpeza por blocos (peachy cleaning) (Norma VDI3926, 2003).

## 2.6 REMOÇÃO DA TORTA DE FILTRAÇÃO

A remoção da torta de filtração ocorre quando a força de desaglomeração exercida sobre a camada de partículas é maior que a força de adesão que liga as partículas ao meio filtrante (CALLE, 2001).

Após a limpeza do filtro ser realizada, seria de se esperar que o tecido voltasse a ter suas propriedades iniciais, ou seja, que a torta fosse removida completamente e uniformemente em todas as partes do tecido, pela imposição de uma força suficiente para romper as forças de coesão entre as partículas e as forças de adesão entre torta e tecido, porém não é isso o que acontece na prática. O que se observa na prática é o fenômeno conhecido como “patchy cleaning” ou limpeza de blocos, no qual parte da torta é removida completamente, exceto por uma fina camada de pó, e outras partes da torta permanecem intactas. Na Figura 2.19 estão ilustradas a formação da torta de filtração e o fenômeno de Patchy Cleaning.

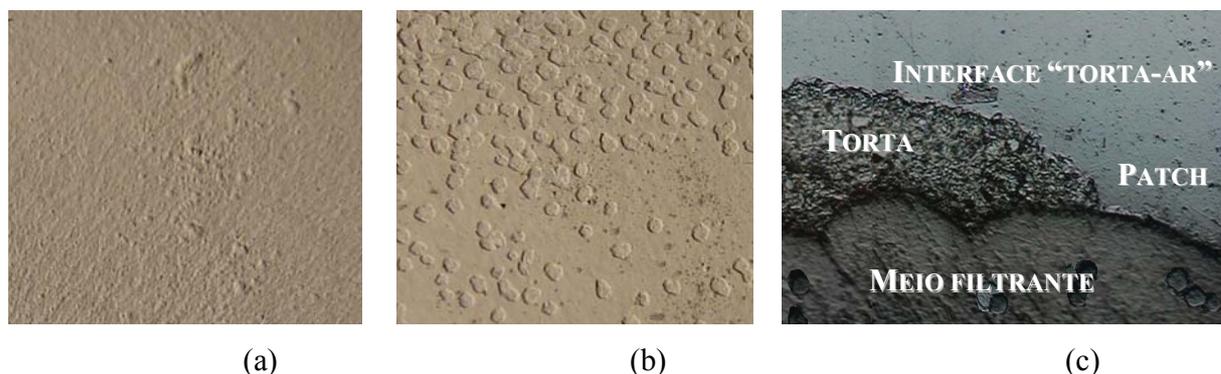


Figura 2.19: (a) Superfície do meio filtrante com a torta de filtração e (b) Fenômeno Patchy Cleaning e (c) Imagem do fenômeno patchy cleaning geradas no microscópio ótico (ampliação 200 vezes) (TANABE et al., 2008).

Uma das explicações, sugerida por Koch (1996), para que esse fenômeno ocorra é que geralmente, a torta formada e o meio filtrante não são uniformes, e possuem propriedades que variam nas direções paralela e perpendicular ao filtro, então podem existir regiões mais fracas, ou seja, irregularidades na força de adesão entre as partículas e o meio filtrante, gerando áreas preferenciais de limpeza, onde as rachaduras se iniciam e se propagam.

A força de coesão também tem um papel importante na limpeza da torta. Quanto maior a força de coesão, maior o tamanho dos fragmentos de torta destacados (CALLE, 2001).

Após a limpeza da torta, pode ser observada uma perda de carga residual. O valor da perda de carga residual aumenta com o número de ciclos e tende a um valor limite. Este período é denominado período de condicionamento e pode durar dezenas ou centenas de ciclos. Em alguns casos extremos a saturação do tecido não é atingida, o equilíbrio não é estabelecido, e a queda de pressão residual não se torna constante.

Mauschitz et al. (2004) diz que a perda de carga residual poderia ser dividida em duas frações: a primeira constituída por partículas depositadas nas camadas internas próximas à superfície do meio filtrante, responsáveis pela resistência ao fluxo do ar no interior do meio filtrante; e a segunda composta pelas partículas depositadas na camada externa do filtro, consistindo da torta remanescente.

Callé et al. (2002 a) afirmam que a perda de carga residual está relacionada ao fato de algumas partículas coletadas pelo meio filtrante não conseguirem ser removidas. Segundo Stocklmayer e Hollinger (1998), a queda de pressão residual está ligada à compressão da camada de partículas coletadas pelo meio filtrante.

Durante algum tempo a perda de carga residual era tida como parâmetro de indicativo de grau de limpeza do filtro. Porém, de acordo Duo et al (1997) o aumento na camada residual de pó não explica o aumento na perda de carga residual.

## 2.7 TÉCNICAS DE LIMPEZA DOS FILTROS

Conforme mencionado anteriormente, quando a torta de filtração atinge uma dada espessura, determinada pela queda de pressão máxima desejável, é necessário que esta seja destacada do meio filtrante por métodos de limpeza.

Deve-se ser muito cauteloso no que diz a respeito a limpeza do filtro, porque uma limpeza mal feita ocasiona um aumento na queda de pressão residual. E uma limpeza muito rigorosa pode danificar o tecido, reduzindo seu tempo de vida útil (LORA, 2002).

O desprendimento da torta formada no meio filtrante pode ser feito por várias técnicas de limpeza de filtros dentre as quais as mais usadas são:

Vibração mecânica: É a técnica mais antiga de limpeza de filtros e é de custo relativamente baixo. Geralmente, o tecido é vibrado por meio de um motor excêntrico que provoca a vibração do tecido criando uma aceleração no mesmo, que é função da frequência e da amplitude de vibração que promove a limpeza. Esta técnica requer a interrupção do processo de filtração durante a limpeza, que dura de 2 a 5 minutos. A Figura 2.20 mostra a filtração do gás sujo com a posterior limpeza através da técnica de vibração.

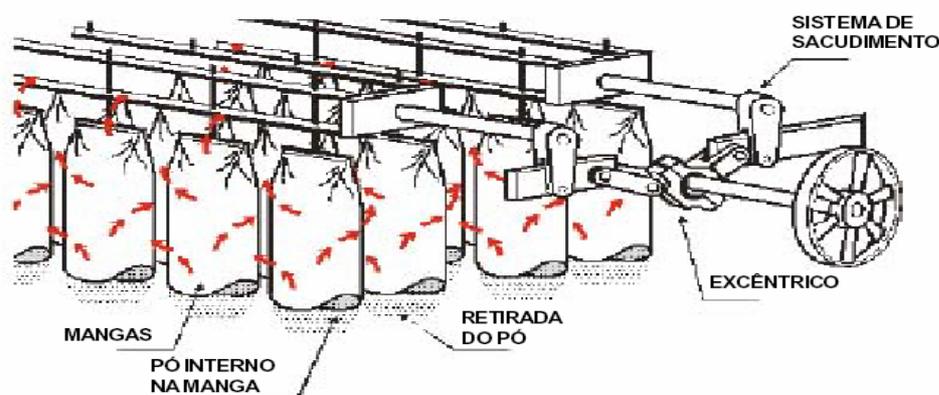


Figura 2.20: Filtração do gás sujo com a posterior limpeza pela técnica de vibração (Renner Têxtil Ltda, 2001).

Fluxo de ar reverso: A limpeza por fluxo de ar reverso é realizada com o auxílio de um ventilador que produz um fluxo de ar no sentido inverso ao da filtração, que fratura e depois desloca a torta. Neste caso, a coleta da partícula é realizada no interior das mangas. Esta técnica também exige a interrupção da filtração durante a limpeza. O tempo de limpeza varia de 2 a 5 minutos. A sua vantagem em relação ao vibratório é uma maior duração no tempo de vida do tecido. A Figura 2.21 mostra a filtração do gás sujo com a posterior limpeza através da técnica do fluxo de ar reverso.

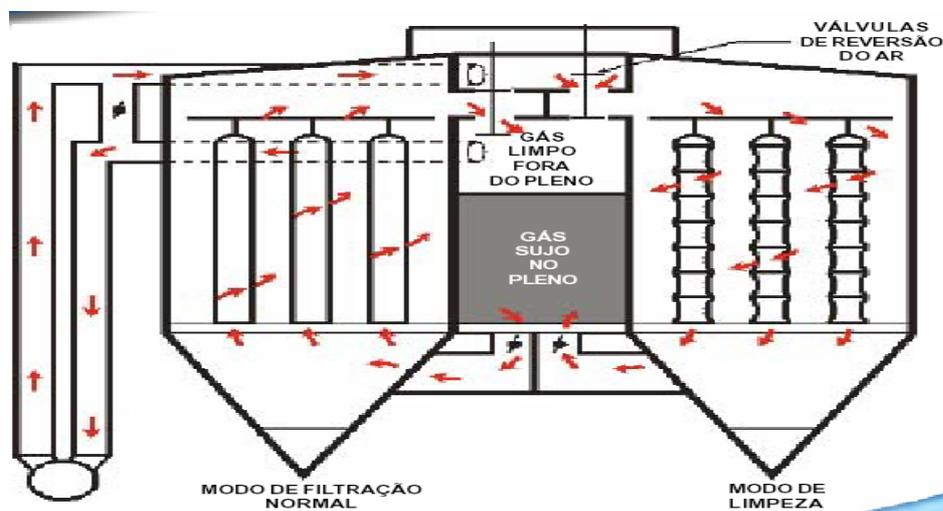


Figura 2.21: Filtração do gás sujo com a posterior limpeza pela técnica do fluxo de ar reverso (Renner Têxtil Ltda, 2001).

Pulso de ar reverso: Este método de limpeza é semelhante ao método de fluxo de ar reverso. A limpeza se processa por meio de pulso de ar comprimido que é direcionado para o venturi, situado no topo das mangas. Dessa forma é induzido ar já filtrado para o interior da manga, invertendo momentaneamente o sentido do fluxo de gases, fazendo com que o material particulado acumulado no exterior das mangas seja removido. A limpeza ocorre em frações de segundos dispensando a interrupção da filtração. A Figura 2.22 mostra a filtração do gás sujo com a posterior limpeza através da técnica do pulso de ar reverso

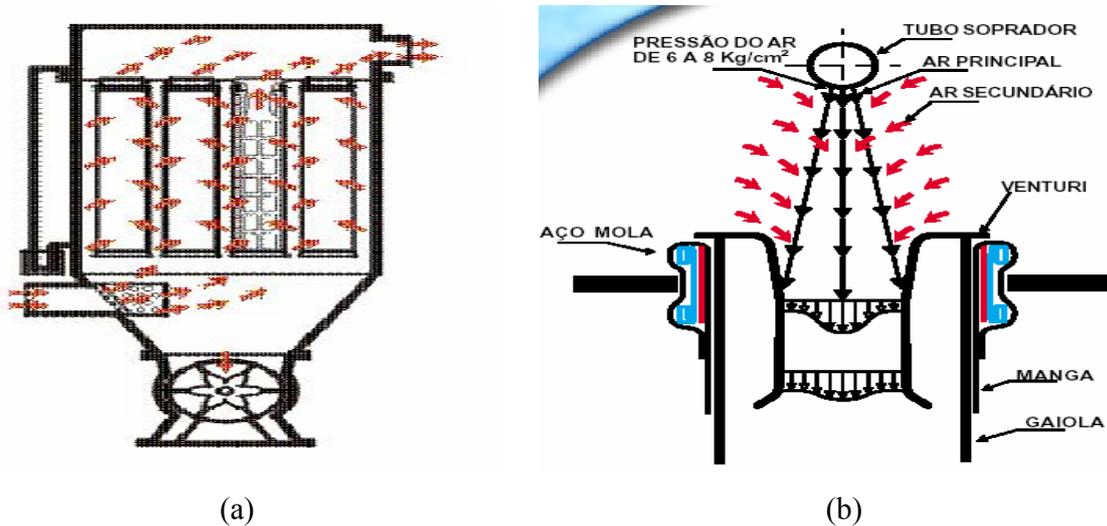


Figura 2.22: Limpeza pela técnica do pulso de ar: a) Filtração do gás e b) processo de limpeza (Renner Têxtil Ltda, 2001).

## 2.8 VARIÁVEIS IMPORTANTES NO PROCESSO DE FILTRAÇÃO

Durante a filtração algumas variáveis devem ser melhor estudadas para o sucesso do projeto e operação de filtros, que serão analisados a seguir.

### 2.8.1 Queda de Pressão

A queda de pressão ou perda de carga é uma importante variável de projeto, que descreve a resistência que enfrenta o fluxo de gás ao passar pelo filtro. A queda de pressão total de um sistema é determinada pela medida da diferença de pressão total em dois pontos do filtro, usualmente medida na entrada e na saída (SEVILLE, 1997).

O aumento da perda de carga do sistema ocorre à proporção que as partículas são depositadas durante os ciclos de filtração. Esta variável é muito importante, uma vez que determina a frequência de limpeza do filtro e, conseqüentemente, afeta o tempo de vida do tecido (JEON e JUNG 2004). Além disso, a máxima perda de carga, antes da limpeza, pode ser empregada para determinar a potência requerida no sistema. Os valores das perdas de carga operacionais são geralmente na faixa de 750 a 2000 Pa (SEVILLE, 1997).

A perda de carga residual tende a aumentar após cada ciclo, pelo crescente acúmulo de partículas no tecido (DULLIEN, 1989). Após vários ciclos este valor tende a se estabilizar,

porque o tecido fica saturado de pó. O tempo de saturação do tecido depende do tipo do material do filtro, do tamanho das partículas e do tempo e tipo de remoção da torta (CALLÉ et al, 2002 b).

Existem diferentes equações para descrever a queda de pressão durante a filtração. Uma delas é uma aproximação cumulativa, que divide a queda de pressão total no filtro em duas partes: a queda de pressão do meio filtrante,  $\Delta P_m$ , e a queda de pressão devido a torta de filtração formada,  $\Delta P_c$ . Logo, a pressão total é dada pela Equação (2.1).

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

A lei de Darcy pode ser usada para descrever a queda de pressão através do meio filtrante e da torta de filtração, quando a filtração é conduzida a baixos valores de Reynolds. Desta maneira, a Equação (2.2) é denominada de equação da filtração.

$$\Delta P_T = K_m \cdot V + K_c \cdot V \cdot W \quad (2.2)$$

Sendo  $K_m$  a resistência específica do meio filtrante,  $K_c$  a resistência específica da torta,  $V$  a velocidade superficial do gás e  $W$  a massa de pó depositada por unidade de área.

Se ambos os membros da Equação (2.2) forem divididos por  $V$ , obtém-se a Equação (2.3).

$$\frac{\Delta P_T}{V} = S = K_m + K_c \cdot W \quad (2.3)$$

A razão entre a queda de pressão e a velocidade específica do gás é denominada de arraste (S). O arraste, ao invés da queda de pressão, é a medida da resistência aerodinâmica do filtro preferida por modeladores, porque o seu uso preserva o conceito da propriedade da camada do meio, independente da velocidade de escoamento (DONOVAN, 1985).

### 2.8.2 Velocidade de Filtração

A velocidade de filtração é um variável importante no processo de filtração de gases, porque está diretamente relacionado com o tempo necessário para a filtração, o desgaste do tecido e a profundidade que o material particulado consegue penetrar no tecido e, juntamente com o método de limpeza, determina as dimensões do filtro.

Sendo assim, essa variável é altamente influente no custo inicial do equipamento, e também no custo operacional. Recomendam-se, velocidades de 0,5 a 10 cm/s (LEITH e ALLEN, 1986).

Altos valores na velocidade de filtração levam a um tempo de filtração pequeno, porém com alta penetração das partículas no tecido, o que dificultaria a remoção da torta, além de aumentar a queda de pressão durante a filtração e após a remoção da torta (queda de pressão residual); conseqüentemente, a vida útil do tecido seria menor. Por outro lado, altas velocidades de filtração reduzem a área de filtração requerida, diminuindo o custo inicial, operacional e de manutenção dos filtros.

No caso de baixos valores de velocidade de filtração, tem-se um maior consumo de energia, já que o tempo de retenção das partículas seria maior (DONAVAN, 1985). Entretanto, a interação entre a partícula e tecido é reduzida, facilitando a remoção da torta.

Silva Neto (1996), estudando a remoção da torta em tecidos de poliéster, realizou ensaios de filtrações com velocidades de 7 cm/s, 11 cm/s e 15 cm/s e verificou que a porcentagem massa desprendida da torta decresce e a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade de filtração.

Lucas (2001), estudando também remoção de tortas em diferentes materiais particulados, e com três velocidades de filtração de 6 cm/s, 9 cm/s e 11 cm/s, concluiu que a resistência específica da torta aumentou com a velocidade de filtração para todos os materiais estudados e que a porosidade da torta diminuiu com o aumento da velocidade de filtração para a rocha fosfática.

### 2.8.3 Porosidade do meio filtrante

A porosidade do meio filtrante é um importante parâmetro estrutural do meio filtrante. Esse parâmetro define a relação de espaços vazios, poros, presentes no meio. A porosidade total  $\varepsilon_t$ , que contribuem e que não contribuem para o escoamento (poros abertos e poros fechados) é obtida pela Equação (2.4).

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (2.4)$$

Sendo  $\rho_s$  a densidade do sólido,  $\rho$  a densidade total do meio ( $\rho = \text{massa de sólidos} / \text{volume total da amostra}$ ).

A porosidade do meio filtrante geralmente é dada pelo fabricante e também pode ser estimada por equações existentes na literatura, que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido. Entre elas pode-se destacar a Equação (2.5) de Ergun (1952), largamente aplicada para leitos granulares com porosidade entre 0,1 e 0,75; e para partículas com diâmetro entre  $10^2$  e  $10^4$   $\mu\text{m}$  e número de Reynolds de partículas maiores que a unidade.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu V_f}{d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot V_f^2}{d_p} \quad (2.5)$$

Sendo  $\rho_g$  a densidade do gás,  $\mu$  a viscosidade do gás,  $V_f$  a velocidade superficial do fluido,  $d_p$  o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes),  $L$  a espessura do meio. (RODRIGUES, 2006).

Mauschitz et al. (2004), estudando a porosidade dos tecidos, verificaram que os filtros de feltro de poliéster mais porosos (85%) apresentam maior retenção de partículas que o filtro de menor porosidade (51%). Segundo os autores, as partículas se acomodaram mais na superfície do filtro menos poroso, devido ao maior número de pontos fundidos encontrados por este tecido. Além disso, estes pontos apresentaram menores forças de adesão, facilitando a remoção e minimizando a massa retida após a limpeza.

#### 2.8.4 Porosidade da torta

Coury (1983) desenvolveu um método, denominado de método indireto, no qual a equação clássica de Ergun (Equação 2.5), foi adaptada para estimar os valores de porosidade das tortas e L passou a ser a espessura da torta que pode ser obtida pelas Equações (2.6) e (2.7).

$$M = Qt = L.A.\rho_p.(1 - \varepsilon) \quad (2.6)$$

Sendo M a massa de torta, Q a vazão mássica de pó, A é a área superficial de torta,  $\rho_p$  a densidade das partículas e t o tempo de filtração. Rearranjando a Equação (2.6) chega-se na Equação (2.7):

$$L = \frac{Qt}{A.\rho_p.(1 - \varepsilon)} \quad (2.7)$$

Substituindo L na Equação (2.5), encontra-se a Equação (2.8) que é a Equação de Ergun Modificada em relação ao tempo de filtração.

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 A \rho_p} \frac{\mu Q V_f}{d_p^2} + 1,75 \frac{Q}{\varepsilon^3 A \rho_p} \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (2.8)$$

A primeira parcela do segundo membro da Equação (2.8) é relativa ao componente viscoso e a segunda parcela é relativa ao componente inercial, sendo esta última desprezível no caso de escoamentos puramente viscosos, como nos gases. Neste caso a Equação (2.8) pode ser reduzida para a Equação (2.9):

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 A \rho_p} \frac{\mu Q V_f}{d_p^2} \quad (2.9)$$

Outros métodos para determinar porosidade foram estudados por Aguiar (1995) e Cheng e Tsai (1998). Aguiar (1995) determinou a porosidade a partir da obtenção de imagens representativas da seção transversal de tortas de filtração de gases obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e, posteriormente, analisadas em programas de análises de imagens, sendo este método denominado de método direto. Cheng e Tsai (1998) determinaram a porosidade usando valores de espessura da torta medida em um equipamento a laser e da massa de pó depositada no meio filtrante por unidade de área.

Negrini et al. (2001) estudaram a determinação da porosidade de tortas em função da velocidade de filtração e concluíram que a porosidade média experimental diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração.

Ito (2002) estudou a porosidade das tortas para diferentes materiais particulados como a rocha fosfática, o amido de milho e o polvilho doce. Entre os materiais orgânicos, os valores da  $\epsilon$  do polvilho doce foram menores do que os do amido de milho. Isso pode ter ocorrido devido às características físicas e químicas do pó, mais precisamente o formato das partículas. O polvilho doce possui partículas esféricas e é um material que sofreu maior compactação, aumentando o empacotamento e com isso tendendo a menores valores de porosidades. Já o amido de milho possui partículas com formatos irregulares e é menos coeso, pois apresentou um menor compactação, durante a filtração.

Segundo Cheng e Tsai (1998), as partículas de formatos irregulares com pequena faixa de distribuição granulométrica, são conduzidas ao filtro intercalando uma sobre a outra ao acaso e de maneira irregular, aumentando a porosidade, enquanto as partículas esféricas, por terem o mesmo formato, preenchem mais os espaços intersticiais permitindo uma menor porosidade.

### **2.8.5 Permeabilidade do meio filtrante**

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de seus poros ou vazios. Idealmente, o filtro deveria remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Isso pode ocorrer aumentando o volume de vazios na estrutura (porosidade) ou o tamanho da passagem do fluido (poro). Nas aplicações de filtração, baixas permeabilidades implicam em baixas taxas de

filtração, o que não é economicamente vantajoso pra o processo. No entanto, estrutura com baixa permeabilidade pode ser requerida como prevenção à penetração de agentes indesejáveis que deterioram o material (INNOCENTINI et al, 1999).

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

Duas equações são tradicionalmente empregadas para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, sendo que ambas relacionam os valores de perda de carga com a velocidade superficial. Estas duas equações estão apresentadas a seguir e são conhecidas como as equações de Darcy (Equação 2.10) e de Forchheimer (Equação 2.11).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} \cdot V_s \quad (2.10)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{K_1} \cdot V_s + \frac{\rho}{K_2} \cdot V_s^2 \quad (2.11)$$

Sendo L a espessura do meio filtrante,  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $\rho$  a densidade. O termo  $\frac{\mu}{K_1} \cdot V_s$

representa os efeitos viscosos, enquanto  $\frac{\rho}{K_2} \cdot V_s^2$  representa os efeitos cinéticos ou inerciais.

Para os casos de escoamentos puramente viscosos, a Equação (2.10) pode ser utilizada. Nesta equação, a constante  $1/K_1$  é conhecida como sendo o coeficiente de permeabilidade do meio poroso. Com o aumento da velocidade de escoamento, a equação de Darcy deixa de ser satisfatória, já que os efeitos inerciais tornam-se importantes e devem ser considerados. Nestes casos observa-se um comportamento parabólico da perda de carga em relação à velocidade superficial, sugerindo-se o uso da equação de Forchheimer para caracterizar o sistema.

Innocentini et al. (1999), estudando a equação de Forchheimer, verificou que esta equação é amplamente aplicada para uma larga faixa de velocidades e em muitos leitos porosos.

Além de simples, é a que descreve, de um modo mais geral, os principais fatores que influenciam a permeabilidade do meio poroso. No entanto, os referidos autores testaram a importância da parcela não linear ou inercial, verificando a mesma poderia ou não ser desconsiderado. Para tal, foi utilizado um parâmetro de comparação, o número de Forchheimer,  $F_o$ , que relaciona as forças viscosas e cinéticas que contribuem para a perda de carga, apresentado pela Equação (2.12).

$$F_o = \frac{\rho \cdot V_s}{\mu} \cdot \frac{K_1}{K_2} \quad (2.12)$$

Desta forma, para  $F_o \ll 1$ , a Equação (2.11) pode ser reduzida a Equação (2.10), enquanto que para  $F_o=1$ , a desconsideração do termo quadrático da equação ocasiona desvios de até 50% do valor real da permeabilidade.

## 2.8 ESTUDOS EXPERIMENTAIS

A seguir serão apresentados os principais trabalhos que abrangem o estudo da remoção e deposição das partículas em meios filtrantes de tecido.

Nóbrega e Coury (1992), empregando o método de vibração mecânica, estimaram a força de adesão por unidade de área para 4 frações de rocha fosfática com diâmetros médios de 15 ; 7 ; 4,8 ; 1,5  $\mu\text{m}$ , em aproximadamente 4,2 ; 6,9 ; 14,6 e 32,6  $\text{N/m}^2$ . Estes autores fundamentaram-se na teoria de Rumpf relacionando a força de adesão com a tensão de ruptura e encontraram resultados semelhantes ao da força de adesão estimada. Avaliando também a influência da espessura da torta na taxa de remoção, encontraram que em tortas com espessuras maiores que 0,07  $\text{g/cm}^2$ , a remoção foi mais rápida e eficiente.

Rembor e Kasper (1996) estudando deposição das partículas, a perda de carga e a eficiência de filtração em partículas de sílica e pentacarbonil, concluíram que variando o diâmetro das partículas, as partículas de menor tamanho penetram mais intensamente no meio filtrante. Da mesma forma, outros autores concordaram que a penetração de partículas no interior do filtro é menos intensa quando se trabalha com partículas de maior diâmetro, sob condições experimentais semelhantes (THOMAS et al., 2001; DAVIS E KIM, 1999; LISOWSKI et. al., 2001; JAPUNTICH et al., 1994; WALSH, 1996).

Walsh (1996), investigando o comportamento das partículas de ácido esteárico em filtros de fibra de vidro, afirmou que quanto maior a retenção de partículas no interior destes filtros, antes da transição de filtração interna para filtração da torta, melhor é o desempenho em termos de custos, uma vez que o aumento da capacidade de captação de partículas significa menor necessidade de troca de tecido e maior vida útil.

Morris e Allen (1996), usando a técnica do pulso mecânico, determinaram a força de adesão para as partículas de sílica com diâmetro igual a 6,2  $\mu\text{m}$ , onde o valor encontrado para a força de adesão foi de 25,4  $\text{N/m}^2$ . Eles observaram também que a força de adesão aumentou com o aumento da massa de pó depositada por unidade de área.

Lucas (2000) estudou a influência das variáveis operacionais na remoção das tortas para os materiais particulados de talco, de rocha fosfática e de polvilho doce para o tecido de poliéster. Os ensaios de filtração foram realizados nas velocidades de 6, 9 e 11  $\text{cm/s}$ . O autor concluiu que o grau de limpeza final das tortas variou significativamente para os materiais estudados, sendo que para o talco e polvilho foi de aproximadamente 90%, enquanto que para a rocha fosfática foi menor que 60%. Observou-se também que para as partículas de rocha fosfática, a porosidade, a resistência específica e a tensão de remoção da torta foram maiores que aos encontrados para o polvilho doce, mostrando uma menor coesividade da torta deste último material.

Thomas et al. (2001), utilizando partículas de soda fluorescente e filtros de fibra de vidro, verificaram que ocorreu um decréscimo exponencial das partículas no interior do meio filtrante, para velocidades variando de 1 a 50  $\text{cm/s}$ , sendo que a camada superficial reteve entre 40 a 70 % das partículas. Verificaram também que nos ensaios com maior tempo de filtração a penetração das partículas foi maior em relação a períodos de menor tempo de filtração, sob a mesma concentração de pó.

Callé et al. (2001) estudaram a performance de dois meios filtrantes para limpeza de ar industrial, utilizando as partículas de alumina para uma velocidade de 2  $\text{cm/s}$ . Os autores concluíram que a força de coesão também tem um papel importante para a limpeza da torta. Quanto maior a força de coesão, maior será o tamanho de fragmentos de torta destacados.

Mauschitz et al. (2003) estudaram os efeitos do tratamento térmico na superfície e o comportamento da limpeza para feltros de poliéster. Os ensaios de filtração foram realizados para uma velocidade de filtração de 0,05  $\text{m/s}$  e partículas de carbonato de cálcio com diâmetro de 0,75 $\mu\text{m}$ . O processo de remoção das tortas foi realizado através do pulso de ar reverso. Os

autores concluíram que a massa residual alojada dentro do meio filtrante e a perda de carga residual diminuíram com o aumento do tempo de tratamento térmico e com o aumento da temperatura e da pressão de finalização na superfície do tecido. A mudança na estrutura da superfície tecido causou um efeito de barreira para as partículas, devido ao aumento no número de pontos fundidos nas fibras, prevenindo a penetração destas partículas dentro do meio filtrante.

Rodrigues (2004) estudou a remoção de tortas de filtração em filtros de polipropileno e de algodão com partículas de rocha fosfática para as velocidades de filtração de 4,5; 6; 7,5 e 9 cm/s. O autor concluiu que o tecido de polipropileno apresentou os maiores valores médios de tensão de remoção da torta e maior percentual de torta removida em relação ao tecido de algodão. Uma possível explicação para esta observação está no fato de que, segundo Billmeyer (1975), o algodão é uma fibra composta por 95% de celulose, com três grupos hidroxilas 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 aconteceu com o polipropileno que é um polímero formado por átomos de carbono e hidrogênio, portanto sem a possibilidade de formação de pontes de hidrogênio.

Mauschitz et al. (2005) investigaram a deposição das partículas dióxido de titânio em diferentes feltros de poliimide para uma velocidade de filtração de 0,05 m/s. O processo de remoção da torta foi realizado através do pulso de ar reverso. Comparando os tecidos de poliimide sem tratamento (FM1) e poliimide com tratamento superficial (FM3), os autores concluíram que nos períodos iniciais dos ensaios de filtração a porosidade superficial do tecido FM1 foi maior em relação ao tecido FM3, porém, após os 100 ciclos analisados, a porosidade superficial dos dois tecidos se aproximaram. Eles observaram também que a perda de carga residual nos períodos iniciais da filtração foi menor para o tecido FM1 em relação ao tecido FM3. Entretanto, após os 70 ciclos de filtração e limpeza, os dois tecidos apresentavam aproximadamente a mesma perda de carga residual e que a massa residual depositada no interior do tecido FM1 foi superior ao tecido FM3. Além disso, após os 100 ciclos a deposição das partículas para o tecido FM3 foi quase desprezível, em contraste do tecido FM1 que as partículas alojadas dentro ficaram constantes somente após os 200 ciclos. Por causa desta maior massa de partículas de dióxido de titânio alojadas dentro do tecido FM1, estas partículas capturadas nas diferentes camadas do tecido provocaram uma redução dos poros, aumentando a perda de carga residual do sistema.

Tieni (2005) realizou um estudo do fenômeno de limpeza de blocos utilizando o material particulado de rocha fosfática e meio filtrante de poliéster e comprovou que a regeneração do tecido está relacionada com a velocidade de limpeza, sendo que a massa de torta removida aumentou conforme aumentou a velocidade de limpeza. Verificou-se também que a maior eficiência de limpeza foi encontrada quando se aumentou a espessura da torta. A melhor velocidade de limpeza para a remoção da torta foi de 13 cm/s e o aumento do tamanho de pedaços removidos foi observado com o aumento na perda de carga máxima.

Tognetti (2007) realizou um estudo da influência das variáveis operacionais na formação e remoção de tortas para tecidos de polipropileno, de poliéster e de acrílico, utilizando a rocha fosfática como material particulado. O autor concluiu que o aumento do tamanho dos pedaços removidos foi observado com o aumento da massa coletada, comprovando que tortas mais espessas são mais facilmente removidas. Verificou também que o número de blocos removidos para o tecido de acrílico é significativamente menor que o número de pedaços removidos para o polipropileno, apesar da pequena diferença entre a área total removida. Isto mostrou que o tecido de acrílico apresentou maiores pedaços removidos de torta em relação ao polipropileno.

Paschoal (2007) realizou um estudo da influência das variáveis operacionais na formação e remoção das tortas apenas para o tecido de polipropileno. O autor observou que para a menor velocidade de limpeza de 5 cm/s ocorreu a menor fração mássica removida no tecido, apresentando uma média de 60,94% nos 10 ciclos observados. Para as velocidades de limpeza de 10 cm/s e de 15 cm/s, obteve-se, respectivamente, as médias de 75,86% e 79,14% de fração de limpeza. O autor estudou também diferentes valores de perda de carga máxima, 20 cmH<sub>2</sub>O e 40 cmH<sub>2</sub>O e verificou-se que para o maior valor da perda de carga máxima, obteve-se os menores valores da resistência específica da torta e os maiores valores da porosidade da torta. Isso demonstrou que variando apenas a espessura da torta, ou seja, variações na perda de carga máxima, provocaram mudanças na estrutura da torta de filtração. Para os maiores valores de perda de carga máxima foram encontrados os maiores valores de área removida, o que contribuiu para a ocorrência de menores valores de perda de carga residual.

Saleem e Krammer (2007) realizaram um estudo do efeito da velocidade de filtração e da concentração de pó na formação de tortas, utilizando partículas de calcário e filtros de manga de poliimide e de polifenilsulfide. Os ensaios foram realizados com velocidades de 20,5 mm/s e 34,1 mm/s e concentrações de pó 4,53 g/m<sup>3</sup> e 7,32 g/m<sup>3</sup>. Os autores concluíram que a velocidade de

filtração teve um efeito mais pronunciado quando comparado com a concentração de pó na perda de carga, bem como nas propriedades da torta, na densidade da torta e na resistência específica. Eles observaram que a resistência específica e a densidade da torta aumentaram com o aumento da velocidade de filtração mantendo-se a concentração do pó constante. Além disso, a densidade da torta também foi afetada pela concentração do pó.

Rud et al. (2007) estudaram o processo de limpeza de diferentes superfícies de tecidos não trançados, utilizando partículas de óxido de alumínio com diâmetro de 4,40  $\mu\text{m}$  e velocidade de filtração de 0,05 m/s. O processo de remoção da torta foi realizado através do pulso de ar reverso. Os autores concluíram que meios filtrantes com menor porosidade superficial e menor volume de poros equivalentes obtiveram menor massa de pó residual no tecido, alojando um menor número de partículas no interior dos meios filtrantes, em 100 ciclos analisados.

Face ao exposto é pertinente o estudo da deposição de partículas em diferentes meios filtrantes, visto que a grande presença de partículas se torna à operação de filtração prejudicial, aumentando os valores da perda de carga residual do processo.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo encontram-se descritos os principais componentes do aparato utilizado para a execução do trabalho experimental. Esta descrição envolve o funcionamento do equipamento de filtração, a coleta dos dados e a caracterização dos materiais particulados e dos meios filtrantes utilizados nos experimentos. Serão mostrados todos os procedimentos adotados no processo de filtração e limpeza, realização das microfotografias no microscópio eletrônico de varredura e no microscópio óptico e as análises das imagens no programa Image-Pro Plus 3.0, para a determinação do diâmetro médio, do número de partículas e da profundidade de deposição das partículas.

Os ensaios de filtração foram realizados no Departamento de Engenharia Química na Universidade Federal de São Carlos.

#### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PULVERULENTOS**

Os materiais pulverulentos utilizados nos ensaios de filtração foram o concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), fornecido pela FÓSFERTIL S.A e também o polvilho doce, da marca Yoki. As Figuras 3.1 (a) e (b) apresentam as fotografias dos materiais particulados obtidas através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A densidade das partículas foi determinada por picnometria a Hélio, através do equipamento AccyPyc 1330 da Micromeritics, sendo o valor da massa específica obtido pela média de três análises. O diâmetro médio volumétrico de partículas foi determinado pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus, que foi realizada a média de cinco medidas. O diâmetro aerodinâmico das amostras foi determinado através do equipamento designado Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320, da TSI, pelo valor médio de duas análises. O diâmetro de Stokes foi determinado no Departamento de Matérias - UFSCar, no equipamento CAPA 700-Particle Sizer Distribution Analyser – HORIBA, pela média de três análises.

Os resultados da caracterização destes materiais particulados foram realizados por Rodrigues (2006) e estão apresentados na Tabela 3.1. As distribuições granulométricas dos materiais particulados foram obtidas e estão apresentadas no Anexo D.

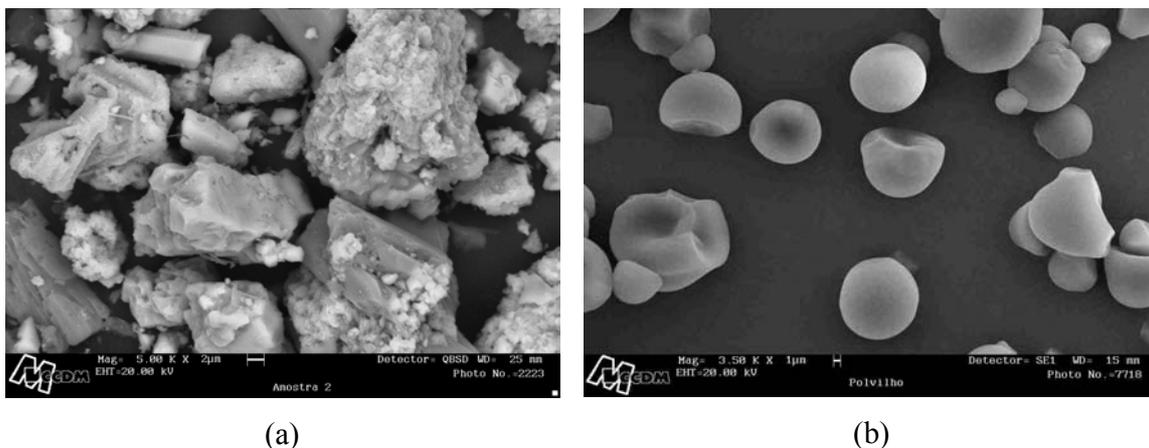


Figura 3.1: Fotografia dos materiais particulados: a) rocha fosfática (aumento de 5000 vezes) e b) polvilho doce (aumento de 3500 vezes), gerados no MEV.

Tabela 3.1: Caracterização do material particulado (RODRIGUES, 2006).

Caracterização	Material	
	Rocha fina	Polvilho doce
Massa Específica ( $10^{-3}$ Kg/m <sup>3</sup> )	2,79	1,48
Diâmetro Médio Volumétrico ( $\mu\text{m}$ )	4,55	14,0
Diâmetro de Stokes ( $\mu\text{m}$ )	3,71	8,67
Diâmetro Aerodinâmico ( $\mu\text{m}$ )	4,13	9,68
Esfericidade	0,73	0,94

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES

Os meios filtrantes utilizados neste trabalho foram fornecidos pela empresa Gino Cacciari. Os resultados de caracterização destes meios filtrantes estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características dos meios filtrantes.

Meio Filtrante	Polipropileno (PP)	Acrílico (AC)	Poliéster Tratado (PT)	Poliéster não tratado (PNT)
*Especificação	3008PP	7002AC	1016P	1016P
*Contextura	Feltro agulhado	Feltro agulhado	Feltro agulhado	Feltro agulhado
*Gramatura (g/cm <sup>2</sup> )	600	550	550	550
*Tratamento Superficial	Calandrado/ Chamuscado	Calandrado/ Chamuscado	Calandrado/ Chamuscado	nenhum
*Espessura nominal	2,5-2,8	2,2	1,9	Não fornecido
*Diâmetro nominal de fibras (µm)	21,0	21,0	21,0	21,0
**Porosidade de Ergun	0,78	0,83	0,82	0,87
**Porosidade Superficial	0,72	0,77	0,81	0,88
**Densidade de Empacotamento	0,28	0,23	0,19	0,12
**Permeabilidade Meio Filtrante (m <sup>2</sup> )	2,20.10 <sup>-8</sup>	5,50.10 <sup>-8</sup>	5,90.10 <sup>-8</sup>	9,40. 10 <sup>-8</sup>

Dados fornecidos: \* pelo fabricante \*\* Obtidos por Rodrigues, 2006.

Estes tecidos disponibilizados pelo fabricante tiveram os tratamentos de calandragem e chamuscagem em uma face. Os meios filtrantes estudados foram cortados em seções circulares de 18 cm de diâmetro, resultando em uma área filtrante igual a 254 cm<sup>2</sup>.

A Figura 3.2 apresenta a superfície dos tecidos de polipropileno, de acrílico, de poliéster e de poliéster não tratado geradas no MEV com uma ampliação de 50 vezes.

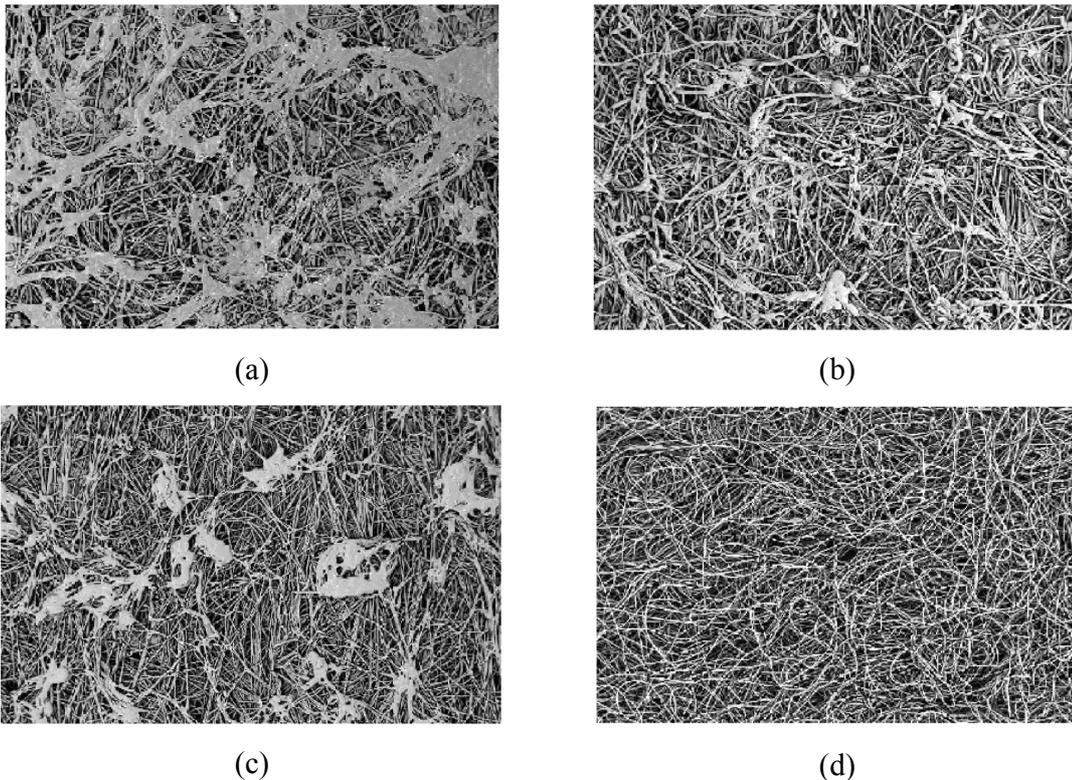


Figura 3.2: Fotos da superfície dos tecidos: a) Polipropileno, b) Acrílico, c) Poliéster tratado e d) Poliéster não tratado, geradas no MEV com aumento de 50 vezes.

Analisando a Figura 3.2 nota-se que o tecido de polipropileno (a) apresenta uma estrutura superficial mais fechada que os demais tecidos, devido ao número de pontos quentes (hot spots), resultantes dos processos de calandragem e chamuscagem. Esta característica ocorre porque as fibras da superfície são fundidas pelo calor do tratamento, resultando em pontos mais fechados na superfície do tecido.

### 3.3 EQUIPAMENTO DE FILTRAÇÃO E COLETA DE DADOS

O sistema utilizado para a filtração e limpeza consistia em uma caixa de filtração, um alimentador de pó, um soprador, um sistema de aquisição de dados e um suprimento de ar comprimido. Este sistema encontra-se montado no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos e está apresentado na Figura 3.3.

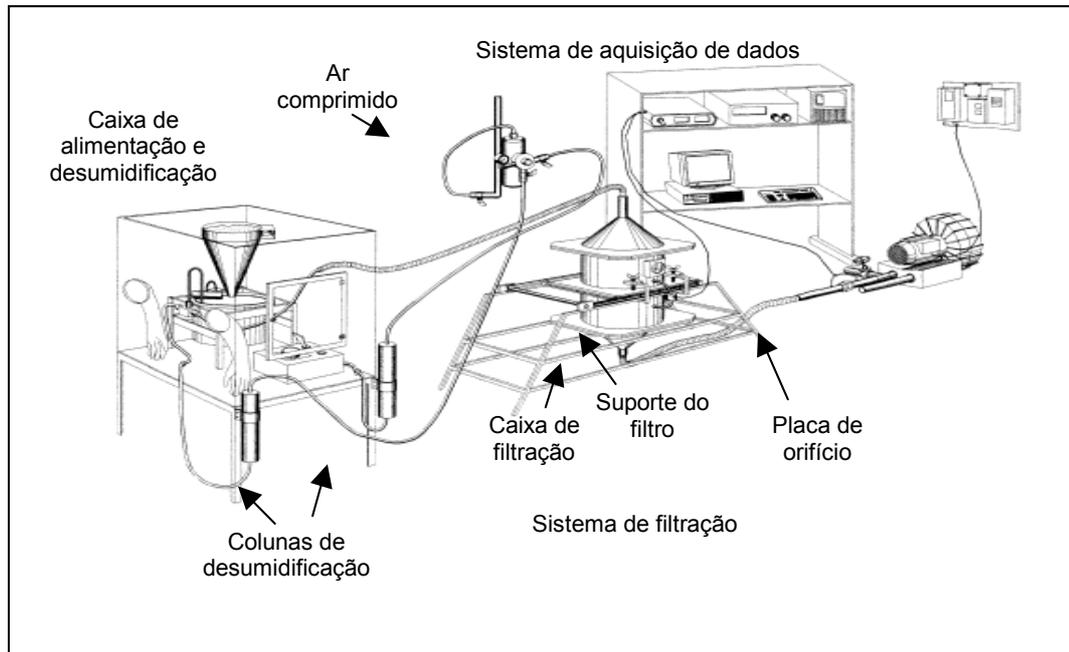


Figura 3.3: Esquema geral do equipamento de filtração e limpeza.

O controle da umidade do ar comprimido utilizado nos ensaios de filtração era feito pela passagem deste, através de dois desumidificadores contendo sílica gel antes de entrar no sistema. Este processo mantinha a umidade do ar entre 8 à 15%.

Para o controle da rotação do soprador foi instalado um transdutor que garantia uma velocidade de filtração constante durante os experimentos tanto para filtração quanto para a realização da remoção da torta.

### 3.3.1 Alimentação do pó

O alimentador de pó consistia de um prato giratório de aço inoxidável com um sulco semicircular e sobre ele fixou-se um cone de alumínio onde o pó era alimentado. Para que o pó pudesse deslocar com facilidade, sem ficar retido no cone, colocou-se um sistema de vibração na parede externa do alimentador de pó, de tal forma que este ficasse vibrando à medida que o pó se deslocasse. Devido ao movimento de rotação e a presença de niveladores, o pó era forçado a preencher o sulco semicircular localizado sobre o prato. Na Figura 3.4 está apresentado o sistema de alimentação do pó.

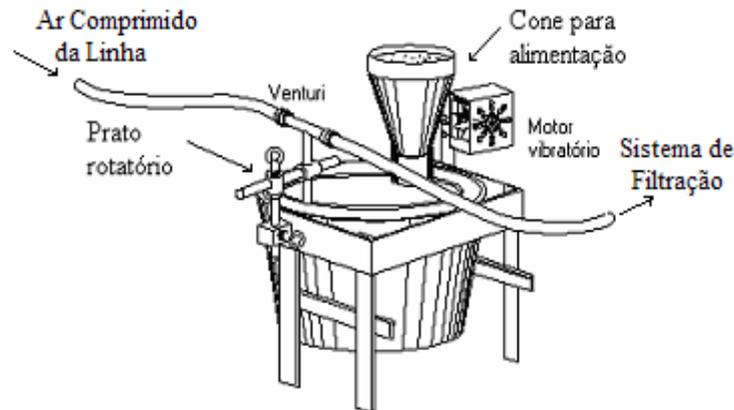


Figura 3.4: Esquema do alimentador de pó.

A velocidade de rotação do alimentador era ajustada através de um controlador e expresso em porcentagem (%) da velocidade máxima. Antes de cada experimento era realizada uma calibração de forma a garantir uma rotação de 0,68 rpm do prato, ou seja, que o prato completasse uma volta a cada 1 minuto e 47 segundos.

Para a sucção do pó foi colocado um sugador do tipo venturi (uma trompa de vácuo), que era alimentado com ar comprimido. A tomada de baixa pressão era conectada ao sulco do prato por um tubo de alumínio, que injetava o pó permanentemente na corrente gasosa à medida que o prato girava. Esse prato era conectado a um variador de velocidade que permitia utilizar diferentes taxas de alimentação de pó. Todo esse conjunto foi isolado em uma caixa de acrílico bem vedada, de modo que a umidade da corrente gasosa fosse controlada e mantida abaixo de 15%.

### 3.3.2 Sistema de filtração

O sistema de filtração, mostrado na Figura 3.5, constituía-se de uma caixa de filtração, que era composta por dois cilindros de PVC que possuíam tampas cônicas uma superior, ligado ao alimentador de pó através de uma mangueira de 2 polegadas, e outra inferior, conectada ao soprador. Entre os dois cilindros era instalada uma moldura de aço inoxidável, para sustentação do meio filtrante.

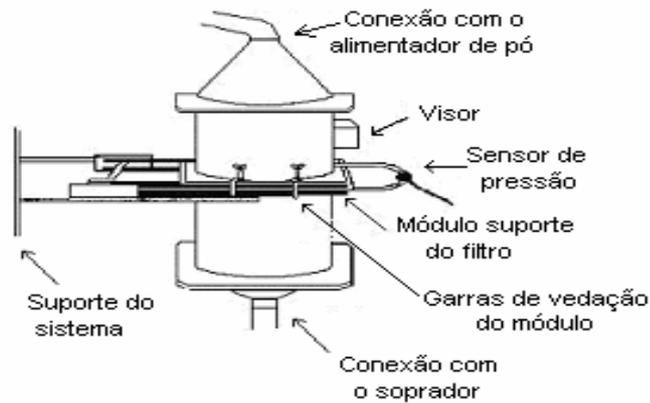


Figura 3.5: Esquema da caixa de filtração.

Acima e abaixo do filtro foi conectado um sensor de pressão para a determinação da perda de carga do filtro. Assim, a placa de aquisição de dados armazenava os valores da perda de carga e o tempo de filtração durante todo o processo.

Este módulo era móvel permitindo que a caixa de filtração fosse mantida na posição vertical durante o processo de filtração e na posição horizontal para o modo de limpeza. As Figuras 3.6 (a) e (b) ilustram melhor estes posicionamentos.

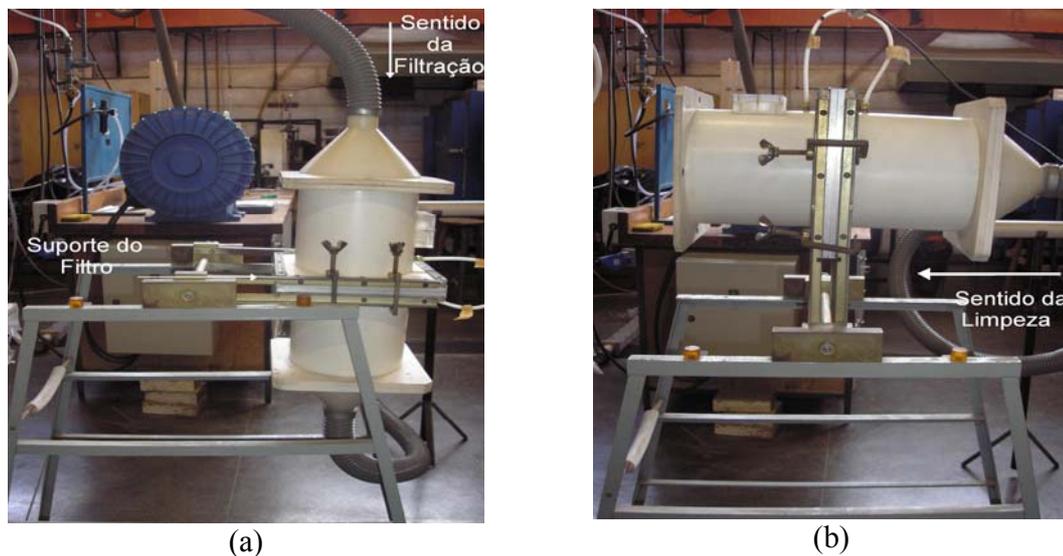


Figura 3.6: Posicionamento da caixa de filtração: a) processo de filtração e b) processo limpeza.

### 3.3.3 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados era constituído por um microcomputador 486 DX2, provido de uma placa de 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 e 24 linhas de entrada-saída digitais (tipo liga-desliga). Todo o experimento era controlado através do software Visual Basic 3.0, que realizava os registros das variáveis de interesse no processo.

As velocidades do ar durante a filtração e a limpeza eram mantidas constantes, em um valor previamente estipulado através do programa com o auxílio de um controlador. Durante a operação de filtração ocorre um aumento contínuo da perda de carga, que tende a diminuir a vazão de ar, para evitar isto, o controlador operava de forma a aumentar a rotação e manter a velocidade constante. Este controle era feito por uma placa de aquisição de dados e por uma placa de orifício calibrada colocada na linha entre os dois medidores de pressão que eram ligados ao micromanômetros digitais.

Para os registros 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.

### 3.3.4 Calibração da placa de orifício

Para calibrar a placa de orifício foi utilizado uma outra placa de orifício com equação conhecida (placa padrão). Esta placa é um dispositivo extremamente simples, constituído de uma placa plana, com um orifício central. Ela é inserida perpendicularmente à direção do escoamento e o fluido passa através do orifício.

As medidas de queda de pressão foram obtidas utilizando-se dois manômetros digitais, um foi conectado na placa padrão de 5 mm de diâmetro e o outro na placa de orifício a ser calibrada de 8 mm de diâmetro. Com a equação fornecida pelo medidor padrão, pode-se ajustar uma curva de vazão na placa de orifício uma para filtração e a outra para limpeza em função da queda pressão através das Equações (3.1) e (3.2) (GONÇALVES, 1999).

$$Q = 555,88 (\Delta h)^{0,455} \quad (\text{Filtração}) \quad (3.1)$$

$$Q = 445,12 (\Delta h)^{0,398} \quad (\text{Limpeza}) \quad (3.2)$$

sendo Q a vazão volumétrica em cm<sup>3</sup>/s e Δh diferença de altura em cm.

Observa-se que ocorreu uma pequena diferença entre as Equações (3.1) e (3.2). Como a calibração foi realizada nos dois sentidos da placa de orifício (uma na filtração e outra para limpeza), as imperfeições no orifício podem ter provocado esta pequena diferença nas curvas.

### **3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.4.1 Ensaios Gerais**

Para a realização dos ensaios de filtração foi estabelecida uma velocidade de filtração de 0,10 m/s e foram coletados dados de perda de carga em função do tempo para dez ciclos de filtração e limpeza. A remoção da torta foi realizada através do fluxo de ar reverso com a velocidade de limpeza de 0,12 m/s, durante um período de dois minutos, através da inversão do sentido do ar.

O aumento da perda de carga estabelecida em cada ciclo foi de 980 Pa. Este valor foi estipulado no experimento por ser usualmente aplicado na indústria.

A pesagem do filtro limpo foi realizada por meio de uma balança Marte Modelo AM5500 de dois dígitos. Após cada filtração o conjunto torta-filtro era novamente pesado para obter a massa de pó depositada. Considerando-se que a alimentação do sistema era constante, obtinha-se o valor da carga mássica aplicada no filtro.

Na operação de limpeza, a posição da caixa de filtração era fixada na posição horizontal e a tampa de PVC superior era removida. Através do software, alterava-se o programa para o modo “limpeza” e estabelecia-se a velocidade de limpeza desejada. A massa de pó removida nesta operação era coletada e pesada, assim como a massa do filtro após a limpeza. Este procedimento foi repetido para cada ciclo.

Antes da realização da análise em microscopia eletrônica, o tecido obtido após a limpeza foi tratado através do procedimento desenvolvido por AGUIAR (1995) constituído pelas etapas de pré-endurecimento, embutimento, seccionamento, esmerilhamento e polimento. Estas etapas estão apresentadas no Anexo A.

As partes analisadas foram retiradas preferencialmente das mesmas regiões do filtro, sendo cada amostra cortada em quadrados de cerca de 1 cm<sup>2</sup>.

### 3.4.2 Obtenção das fotografias no Microscópio Eletrônico de Varredura

As imagens foram geradas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo WDX-3PC, obtidas no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) e no microscópio óptico (MO), modelo OLYMPUS Bx60, obtidas no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química (DEQ).

Os estudos da profundidade de deposição das partículas no interior do meio filtrante foram realizados em duas amostras do tecido, escolhendo-se aleatoriamente um total de 10 perfis transversais do filtro para cada ciclo realizado. Estes perfis foram fotografados, tirando-se dez fotografias seqüenciais do comprimento de cada coluna, desde a superfície torta-ar até aproximadamente 1mm de profundidade. A ampliação para estas imagens foi de 2000 vezes para o MEV e 200 vezes para o MO. Adotou-se esta profundidade limite, porque a partir desta profundidade não se observava mais nenhuma partícula. A Figura 3.7 apresenta uma ilustração de uma seção transversal do tecido com aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  de profundidade.

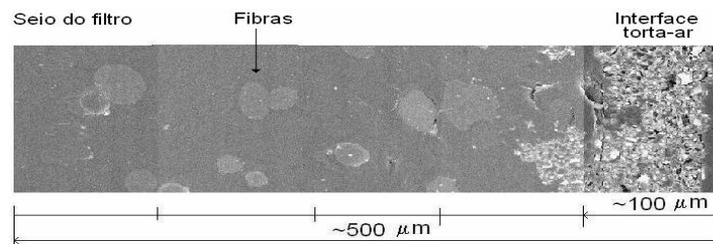


Figura 3.7: Ilustração da seção transversal do tecido desde da superfície torta-ar até aproximadamente 500 $\mu\text{m}$  de profundidade, com aumento de 2000 vezes, geradas no MEV.

### 3.4.3 Análise de Imagens

Posteriormente, as fotografias geradas no MEV e no MO foram processadas no analisador de imagem Image-Pro Plus 3.0, no qual foi possível determinar o diâmetro médio, a profundidade de deposição e o número médio de partículas em cada seção transversal analisada.

Para a realização destas medidas foi utilizado um recurso de binarização, no qual a imagem passava por um processo de transformação em dois níveis de cor: o preto e o branco. Este processo permitiu verificar a distribuição granulométrica das partículas no interior do meio filtrante, em que as partículas de pó apareciam brancas e as resinas como regiões pretas. A Figura 3.8 apresenta as partículas no meio filtrante original e sua binarização realizada pelo software.

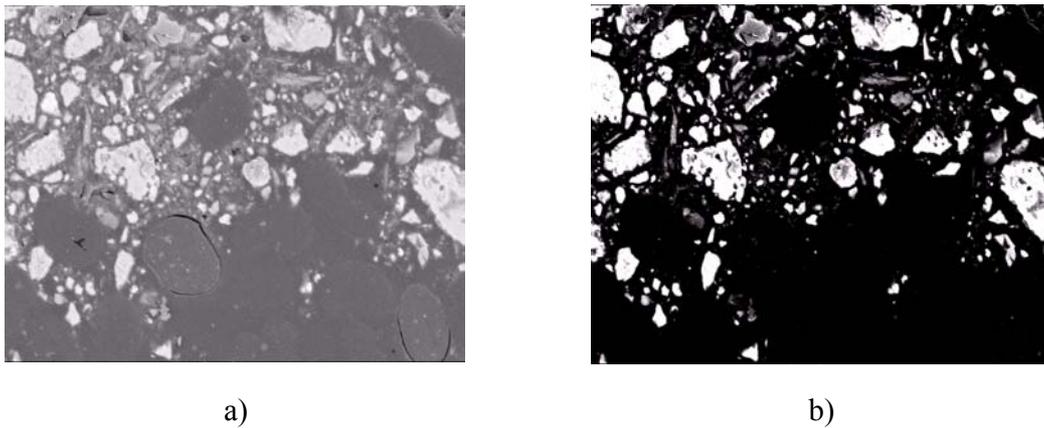


Figura 3.8: Microfotografia das partículas no meio filtrante a) original e b) binarizada com um aumento de 2000 vezes, geradas no MEV.

Desta forma foi possível obter os dados da profundidade de deposição, o número de partículas e o diâmetro médio das partículas depositadas no interior dos meios filtrantes.

### 3.5 CÁLCULO DA PERDA DE CARGA RESIDUAL TEÓRICO

Para estimar os valores da perda de carga residual no meio filtrante foi utilizada a Equação clássica de Ergun (1952) dado pela Equação (2.5):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu V_f}{d_c^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot V_f^2}{d_c} \quad (2.5)$$

Sendo L a espessura do meio poroso,  $\mu$  viscosidade do gás,  $V_f$  velocidade superficial do gás,  $\rho_g$  densidade do gás  $\varepsilon$  porosidade do meio filtrante,  $d_c$  diâmetro do coletor. Os dos valores utilizados nos cálculos estão apresentados a seguir:

$$L=0,0025 \text{ m} \quad \rho_g=1,1876 \text{ kg/m}^3 \quad d_c=21 \mu\text{m}$$

$$\mu=1,835 \cdot 10^{-5} \text{ N.s/m}^2 \quad V_f=0,1 \text{ m/s}$$

Dessa forma as imagens geradas no MEV foram levadas para um analisador de imagens Image-Pró Plus 3.0, em que se conseguiu determinar o volume de partículas depositadas em cada região do tecido. Assim a partir destes resultados utilizou uma planilha do excel para efetuar os cálculos da porosidade do meio filtrante e da perda de carga residual teórico em cada faixa de profundidade analisada.

### 3.6 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTO FATORIAL

Muitos experimentos envolvem o estudo dos efeitos de duas ou mais variáveis durante um processo. Geralmente, planejamentos fatoriais são muito eficientes para este tipo de experimento. Um planejamento fatorial é realizado quando todas as combinações possíveis dos fatores são investigadas num processo.

Os experimentos foram realizados segundo um planejamento estatístico fatorial de três níveis. As variáveis investigadas no processo foram: a velocidade superficial de filtração ( $V_f$ ) e o tempo de filtração ( $t_f$ ) com o intuito de avaliar os efeitos destas variáveis na profundidade de deposição das partículas. A Tabela 3.3 apresenta os níveis utilizados neste planejamento fatorial.

Tabela 3.3: Valores utilizados no planejamento fatorial.

<b>Variáveis</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>+1</b>
<b><math>V_f</math> (m/s)</b>	<b>0,05</b>	<b>0,10</b>	<b>0,15</b>
<b><math>t_f</math> (s)</b>	<b>400</b>	<b>800</b>	<b>1200</b>

Na Tabela 3.4 está apresentado um planejamento experimental  $3^2$ , com todas as possíveis combinações entre as variáveis estudadas.

Tabela 3.4: Matriz com os valores utilizados no planejamento experimental.

<b>Ensaio</b>	<b><math>V_f</math> (m/s)</b>	<b><math>t_f</math> (s)</b>
<b>1</b>	<b>0,05</b>	<b>400</b>
<b>2</b>	<b>0,05</b>	<b>800</b>
<b>3</b>	<b>0,05</b>	<b>1200</b>
<b>4</b>	<b>0,10</b>	<b>400</b>
<b>5</b>	<b>0,10</b>	<b>800</b>
<b>6</b>	<b>0,10</b>	<b>1200</b>
<b>7</b>	<b>0,15</b>	<b>400</b>
<b>8</b>	<b>0,15</b>	<b>800</b>
<b>9</b>	<b>0,15</b>	<b>1200</b>

Após a realização do planejamento fatorial utilizou-se a matriz com os valores fornecidos na Tabela 3.4 para iniciar os ensaios de filtração e encontrar os resultados de profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática no poliéster tratado.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a profundidade de deposição das partículas em diferentes meios filtrantes e diferentes tipos de materiais particulados e também, os efeitos das variáveis operacionais na profundidade de deposição das partículas através de um planejamento fatorial.

A primeira etapa deste estudo teve como objetivo estudar os comportamentos da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática e a quantificação das mesmas para três diferentes tipos de tecidos: o acrílico, o poliéster tratado e o polipropileno. Logo em seguida foi realizado o mesmo estudo para os meios filtrantes de poliéster tratado e poliéster não tratado utilizando como material particulado o polvilho doce. E por fim comparou-se o resultado variando-se o tipo de material particulado: a rocha fosfática e o polvilho doce, no tecido de poliéster tratado.

Na segunda etapa deste trabalho foi realizado um planejamento experimental fatorial a três níveis,  $3^k$ , utilizando apenas o tecido de poliéster tratado e o material particulado de rocha fosfática, para avaliar os efeitos proporcionados pelas variáveis independentes, velocidade de filtração ( $V_f$ ) e tempo de filtração ( $t$ ), nos resultados da profundidade de deposição das partículas.

### **4.1 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO**

Com o intuito de avaliar melhor o comportamento das operações de filtração e regeneração do filtro, construiu-se curvas de perda de carga (Pa) em função da massa acumulada por unidade de área ( $\text{kg/m}^2$ ), para 10 ciclos de filtração e limpeza, realizados em diferentes tipos de tecidos e de materiais particulados. Estes comportamentos podem ser visualizados para as partículas, de rocha fosfática e de polvilho doce nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente.

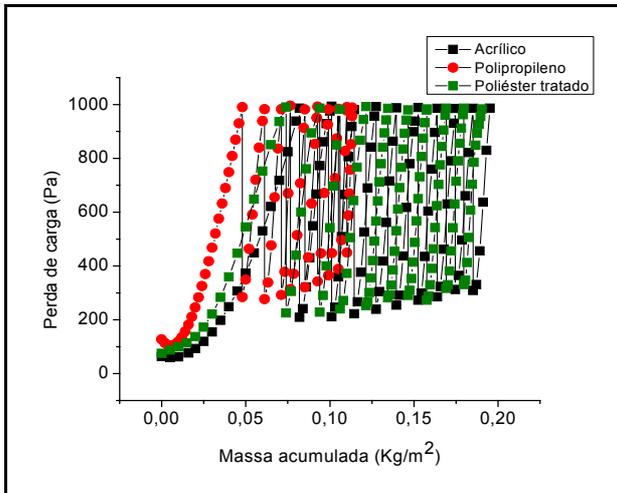


Figura 4.1: Evolução da perda de carga utilizando como material particulado à rocha fosfática.

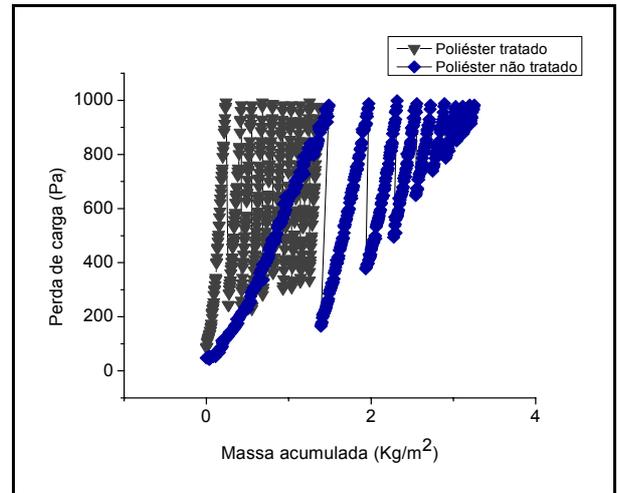


Figura 4.2: Evolução da perda de carga utilizando como material particulado o polvilho doce.

A análise da Figura 4.1 mostra que, no início dos primeiros ciclos, para todos os tecidos, houve uma maior coleta de massa em relação aos demais ciclos, uma vez que no interior destes tecidos havia uma maior quantidade de espaços entre as fibras para acomodação destas partículas. Sendo assim, o comportamento da filtração interna é facilmente observado. No caso do polipropileno, nota-se que esta primeira fase é menos pronunciada em relação ao acrílico e ao poliéster tratado. Isto mostra que os menores valores da permeabilidade ao ar ( $2,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ) e da porosidade superficial (0,72) do tecido de polipropileno, resultaram em uma baixa penetração das partículas no interior do meio filtrante, ocasionando os menores períodos de filtração sendo necessário uma maior frequência de limpeza.

De acordo com Tognetti (2007), os meios filtrantes de acrílico e de poliéster apresentaram um período de filtração interna consideravelmente maior que o obtido para o meio filtrante de polipropileno. Este comportamento foi atribuído às diferentes características dos meios filtrantes, como porosidade e permeabilidade, observando-se que quanto maior a permeabilidade ao ar mais significativa era a filtração interna.

Comportamentos similares foram observados por Osório (2006), que comparou dois meios filtrantes de celulose, chegando à mesma conclusão em relação à permeabilidade dos meios filtrantes e o período de filtração interna.

Este fato também foi observado nos trabalhos de Graef et al. (1995) e de Walsh (1996), que concluíram que a colmatação do tecido ocorre mais rapidamente para filtros mais densamente

empacotados, já que há um menor volume disponível entre as fibras para a deposição das partículas.

Analisando a Figura 4.2, pode-se observar que a ausência de tratamento na superfície do tecido permitiu que um maior número de partículas fossem coletadas e acomodadas no interior do meio filtrante, ou até mesmo atravessassem o tecido, proporcionando um aumento na perda de carga residual, diminuindo a eficiência de coleta e a vida útil do material.

Com a utilização de diferentes materiais particulados, observa-se que as filtrações realizadas com o polvilho doce coletaram maior massa em relação à rocha fosfática, resultando em tortas significativamente mais espessas. Isto sugere que a acomodação das partículas quase esféricas do polvilho doce favoreceu a passagem do ar, conferindo uma menor perda de carga durante os ensaios de filtração.

#### 4.2 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA NO TECIDO DE ACRÍLICO

As imagens das partículas remanescentes na torta de filtração e no interior do meio filtrante, após a operação de limpeza podem ser visualizadas na Figura 4.3. Estas imagens foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV), mostrando a seção transversal do tecido de acrílico com as partículas depositadas em seu interior.

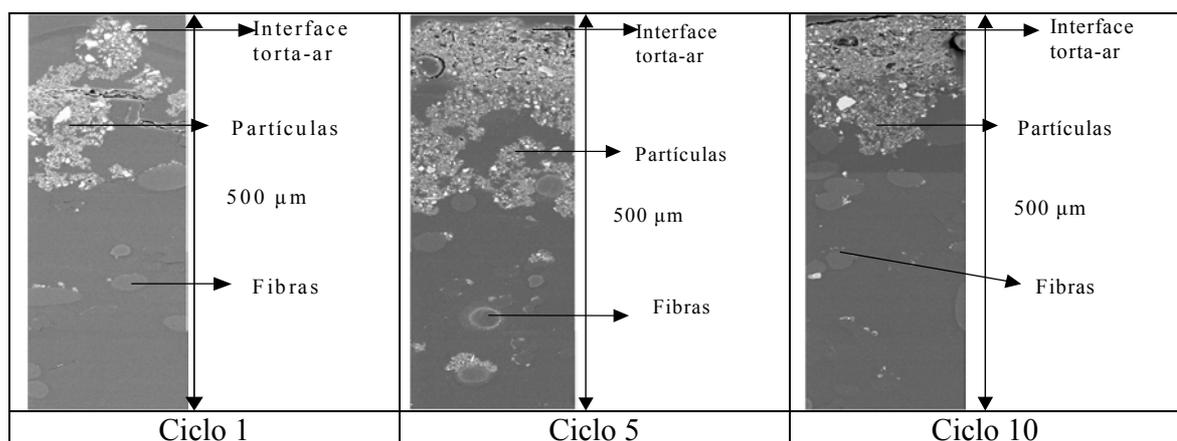


Figura 4.3: Seção transversal do filtro de acrílico e rocha fosfática em diferentes ciclos (aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  da superfície do tecido com o aumento de 2000 vezes).

A Figura 4.3 mostra que ocorreu uma grande quantidade de partículas remanescentes no tecido de acrílico, sendo a maior concentração visualizada na interface torta-ar.

A fim de verificar melhor o comportamento da distribuição granulométrica das partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico, construíram-se curvas do diâmetro médio em função do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. Para a realização das curvas escolheram-se 10 perfis transversais do filtro e realizou-se a média do diâmetro das partículas, para cada faixa de profundidade estudada, sendo estes resultados apresentados na Figura 4.4.

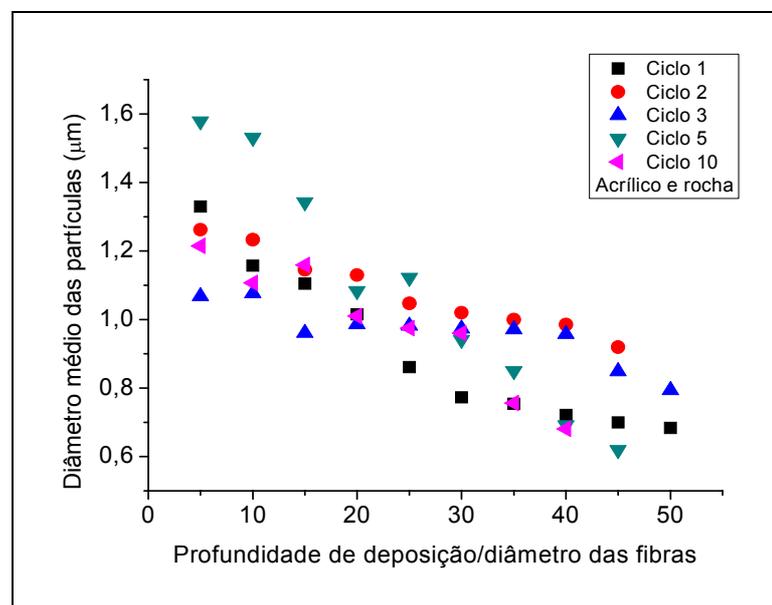


Figura 4.4: Comportamento do diâmetro médio das partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Nota-se na Figura 4.4 que, o diâmetro médio das partículas encontradas no meio filtrante foi maior na superfície torta-ar, havendo uma tendência de diminuir com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. Em relação ao número de ciclos não se conseguiu observar tendência clara do diâmetro médio das partículas aumentar ou diminuir com os ciclos.

Com o objetivo de analisar a quantificação das partículas depositadas no interior do meio filtrante, construíram-se curvas do número médio de partículas em função do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. A obtenção das curvas também ocorreu a partir da escolha de 10 perfis transversais do filtro, realizando uma média do número de partículas

depositadas no tecido, para cada faixa de profundidade estudada, sendo estes resultados apresentados na Figura 4.5.

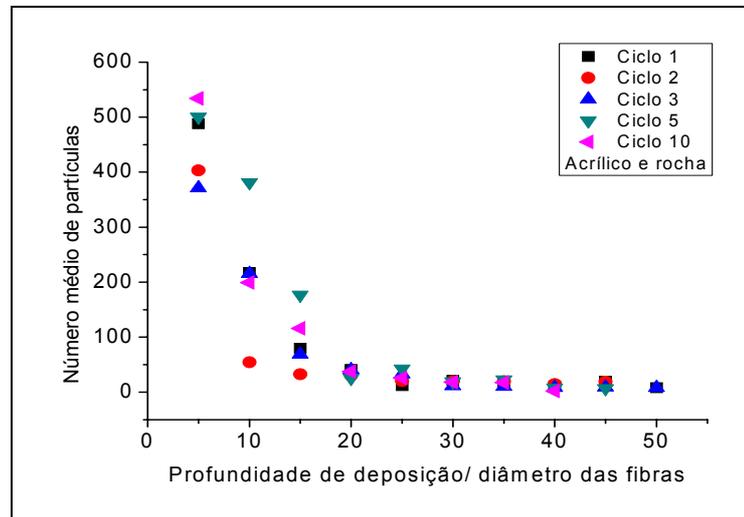


Figura 4.5: Comportamento do número médio de partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Na Figura 4.5 observa-se que a maior concentração de partículas foi encontrada nas camadas superficiais do tecido variando entre 42 a 65%, com uma diminuição exponencial do número de partículas com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, independentemente do número de ciclos. Verifica-se também que os resultados obtidos para o número de partículas apresentaram um alinhamento dos pontos praticamente na mesma curva.

A Tabela 4.1 apresenta os valores da profundidade média de deposição das partículas no tecido de acrílico. Como para cada ciclo foram analisados 10 perfis transversais do filtro, obteve-se uma média destes resultados.

Tabela 4.1: Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de acrílico.

CICLO	PROFUNDIDADE MÉDIA DE DEPOSIÇÃO (μm)	DESVIO PADRÃO
1	615,7	161,79
2	700,0	184,44
3	643,9	169,38
5	588,6	205,24
10	588,5	161,59

Através da Tabela 4.1, pode-se observar que, a profundidade média de deposição das partículas no tecido de acrílico apresentou valores variando entre 588,5  $\mu\text{m}$  a 700  $\mu\text{m}$ . Estes altos valores encontrados para profundidade de deposição mostram que as diferentes características estruturais do tecido, como os maiores valores da permeabilidade ( $5,9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ) e da porosidade superficial (0,77), permitiram que ocorressem um grande acúmulo de partículas e uma das maiores profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática no meio filtrante de acrílico.

### 4.3 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA NO TECIDO DE POLIPROPILENO

As imagens das partículas remanescentes na torta de filtração e no interior do meio filtrante, após a operação de limpeza apresentadas na Figura 4.6. Estas imagens foram obtidas no (MEV), mostrando a seção transversal do tecido de polipropileno com as partículas depositadas em seu interior.

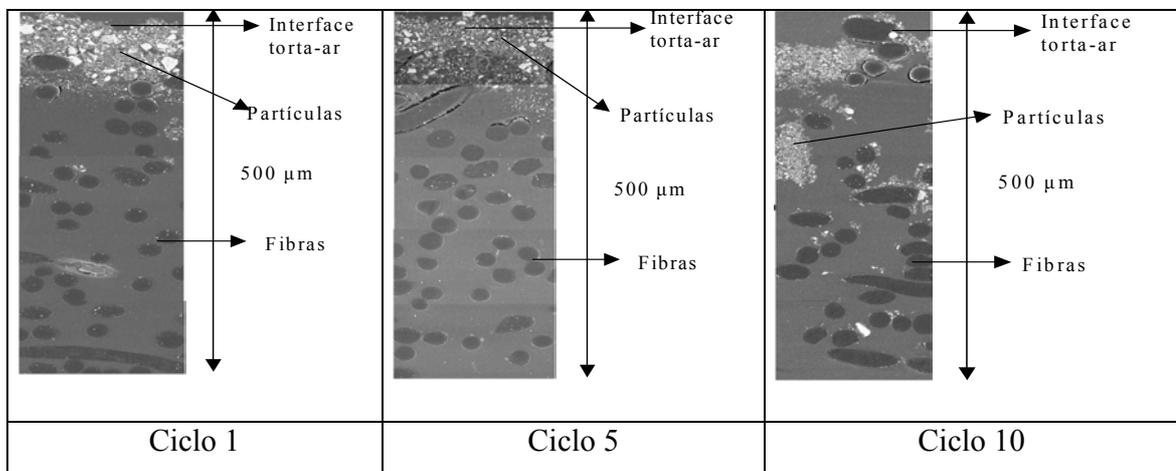


Figura 4.6: Seção transversal do filtro de polipropileno e rocha fosfática em diferentes ciclos (aproximadamente 500  $\mu\text{m}$  da superfície do tecido com um aumento de 2000 vezes).

Observa-se na Figura 4.6 que há uma menor quantidade de partículas no interior do filtro em relação ao tecido de acrílico como visto na Figura 4.3. Este comportamento indica que pelo fato do tecido de polipropileno apresentar uma filtração mais superficial em relação ao acrílico, a rápida formação da torta de filtração e grande acúmulo de partículas na superfície do tecido

facilitaram o processo de limpeza, evidenciando uma menor quantidade de partículas contidas no interior deste tecido.

Para a verificação do comportamento da distribuição granulométrica das partículas de rocha fosfática, contidas no tecido de polipropileno, construíram-se curvas do diâmetro médio em função do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras e estes resultados estão apresentados na Figura 4.7.

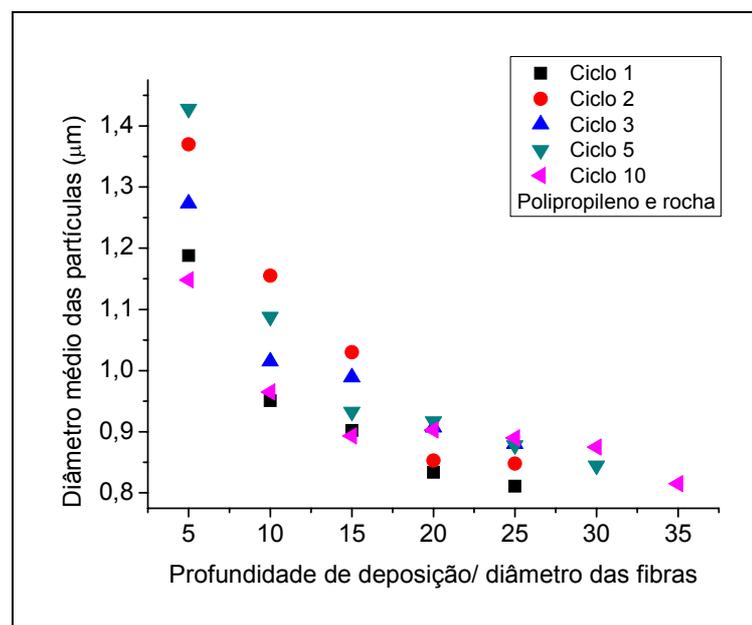


Figura 4.7: Comportamento do diâmetro médio das partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Analisando a Figura 4.7, pode-se observar que as partículas de maior diâmetro ficaram contidas na superfície do tecido, enquanto as de menor diâmetro adentraram mais profundamente no interior do tecido, comportamento muito semelhante ao encontrado no acrílico. Em relação ao número de ciclos não se conseguiu observar tendência clara do diâmetro médio das partículas aumentar ou diminuir com os ciclos.

Para avaliar a quantidade de partículas depositadas no interior do meio filtrante, construíram-se curvas do número médio de partículas de rocha fosfática em função do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras e estes resultados estão apresentados na Figura 4.8.

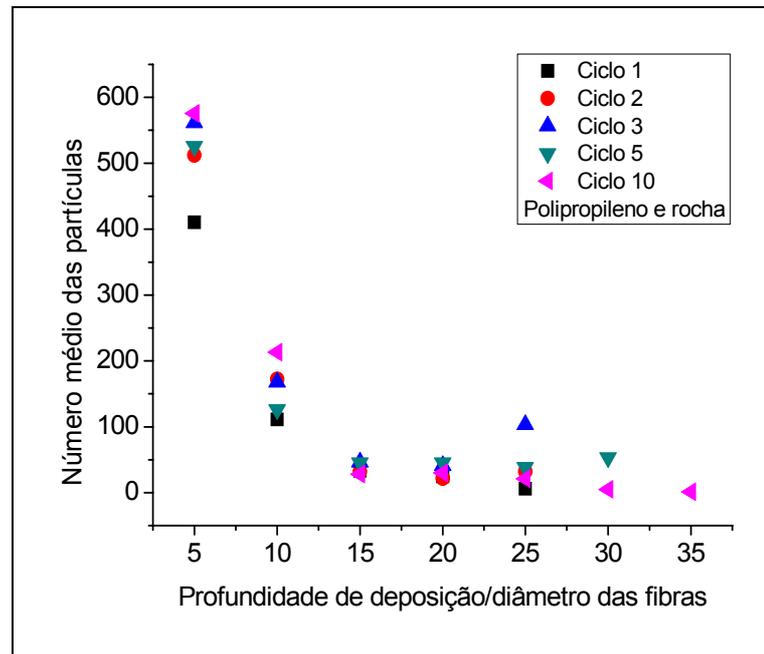


Figura 4.8: Comportamento do número médio de partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Na Figura 4.8 verifica-se que o número de partículas encontradas no interior deste tecido foi inferior em relação ao tecido de acrílico como visto na Figura 5. Isto mostra que, a menor abertura superficial entre as fibras do tecido de polipropileno, ocasionou uma barreira para a penetração das partículas no interior deste meio filtrante. Nota-se que a maior concentração das partículas foi localizada na superfície do tecido variando entre 61 a 70%, diminuindo exponencialmente com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, independente do número de ciclos. Verificou-se também que os resultados obtidos para o número de partículas, apresentaram um alinhamento dos pontos praticamente na mesma curva, como já visto para o tecido de acrílico. Em relação ao ciclo não conseguiu verificar-se nenhuma tendência da quantidade das partículas aumentar ou diminuir com os ciclos.

A Tabela 4.2 apresenta os valores da profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no interior do tecido de polipropileno. Como para cada ciclo foram analisados 10 perfis transversais do filtro, obteve-se uma média aritmética destes resultados.

Tabela 4.2: Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno.

<b>CICLO</b>	<b>PROFUNDIDADE MÉDIA DE DEPOSIÇÃO (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>
1	377,8	82,79
2	352,6	74,26
3	365,2	75,22
5	359,1	153,87
10	409,2	174,29

A análise da Tabela 4.2 mostra que, a profundidade média de deposição das partículas variou entre 352,6  $\mu\text{m}$  a 409,2  $\mu\text{m}$ . Esta baixa profundidade de deposição das partículas mostra que as diferentes características estruturais do tecido, como a menor permeabilidade ( $2,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ) e a menor porosidade superficial (0,72), impediram que as partículas penetrassem mais intensamente no interior do meio filtrante, ficando estas retidas na superfície do tecido.

#### **4.4 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA NO TECIDO DE POLIÉSTER TRATADO**

Neste item serão apresentados os resultados da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática e também a quantificação dos mesmos encontrados no tecido de poliéster tratado.

As imagens das partículas remanescentes da torta de filtração e no interior do meio filtrante de poliéster tratado, após a operação de limpeza estão apresentadas na Figura 4.9. Estas fotografias foram geradas no MEV, mostrando a seção transversal do tecido de poliéster tratado com as partículas de rocha fosfática depositadas no interior desse meio filtrante.

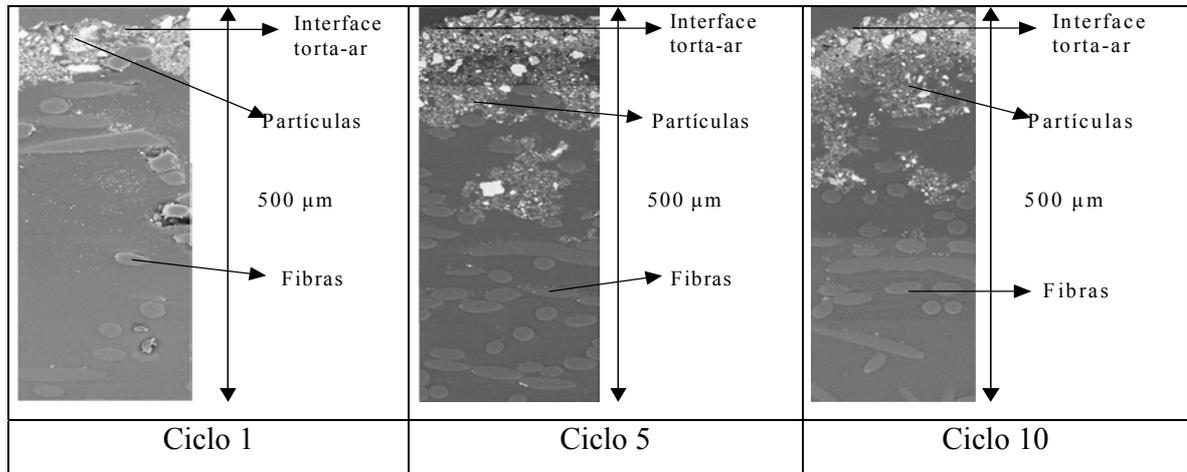


Figura 4.9: Seção transversal do filtro de poliéster tratado e rocha fosfática em diferentes ciclos (aproximadamente 500 µm da superfície do tecido com um aumento de 2000 vezes).

Analisando a Figura 4.9 observa-se que a quantidade de partículas remanescentes no tecido foi superior ao tecido de polipropileno como visto na Figura 4.6. Isto indica que a maior abertura entre as fibras do tecido proporcionou um maior período de filtração interna e uma maior deposição das partículas em relação ao tecido de polipropileno.

A fim de verificar melhor o comportamento da distribuição granulométrica das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado, construíram-se curvas do diâmetro médio em função do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras e os resultados estão apresentados na Figura 4.10.

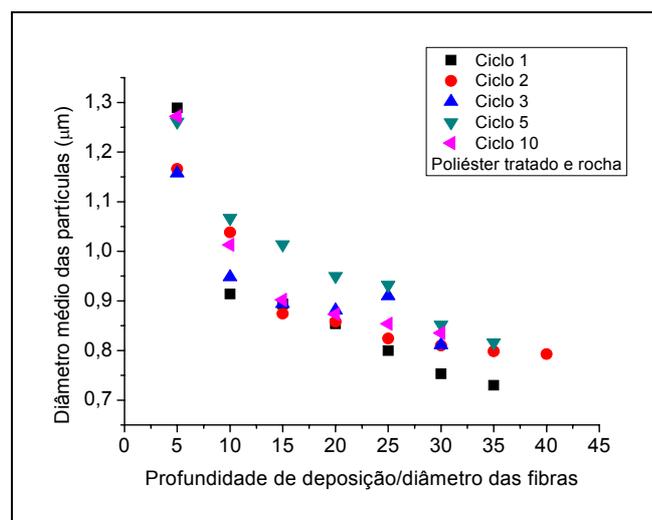


Figura 4.10: Comportamento do diâmetro médio das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Nota-se na Figura 4.10 que o diâmetro médio das partículas encontrados na superfície foi maior aos encontrados no interior do meio filtrante, comportamentos muito próximos ao do acrílico e do polipropileno vistos nas Figuras 4.4 e 4.7, respectivamente. Em relação ao número de ciclos não conseguiu observar tendência clara do diâmetro médio das partículas aumentar ou diminuir com os ciclos.

A fim de verificar a quantificação das partículas encontradas no interior do meio filtrante, construíram-se curvas do número médio das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado em função do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, para cada faixa do tecido analisado, ilustradas na Figura 4.11.

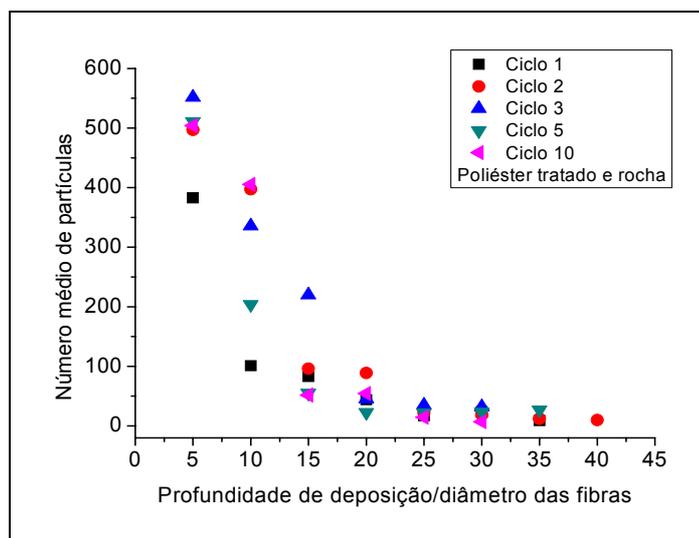


Figura 4.11: Comportamento do número médio de partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Verificou-se na Figura 4.11 que, como para os demais tecidos, o maior número de partículas concentrou-se na superfície do tecido, que variou entre 43 a 58%, tendendo a diminuir exponencialmente com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. Observou-se também que este tecido obteve a menor quantidade de partículas contidas na superfície entre os tecidos estudados e que os resultados obtidos para o número de partículas, apresentaram um alinhamento dos pontos praticamente na mesma curva, como visto para os outros dois tecidos. Em relação ao efeito do número de ciclos de filtração não se conseguiu verificar tendência clara do aumento ou diminuição da quantidade de partículas com os ciclos.

Os resultados da profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de polipropileno estão apresentados na Tabela 4.3. Como para cada ciclo foram analisados 10 perfis transversais do filtro realizou-se uma média aritmética da profundidade de deposição das partículas para cada ciclo analisado.

Tabela 4.3: Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática no tecido de poliéster tratado.

CICLO	PROFUNDIDADE MÉDIA DE DEPOSIÇÃO ( $\mu\text{m}$ )	DESVIO PADRÃO
1	565,2	92,64
2	517,2	161,94
3	523,3	56,17
5	510,1	113,70
10	544,9	62,61

Analisando a Tabela 4.3 nota-se que, a profundidade média de deposição das partículas no tecido de poliéster tratado variou entre 510,1  $\mu\text{m}$  a 565,2  $\mu\text{m}$ . Estes altos valores encontrados para profundidade de deposição mostraram que as características estruturais semelhantes ao do acrílico, como os maiores valores da permeabilidade ( $5,9 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ) e da porosidade superficial (0,76), permitiram um grande acúmulo de partículas e uma das maiores profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática neste meio filtrante.

#### 4.5 COMPARAÇÕES DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA ENTRE OS DIFERENTES MEIOS FILTRANTES

A Figura 4.12 apresenta os resultados da profundidade média de deposição das partículas encontradas para os tecidos de polipropileno, de poliéster tratado e de acrílico com o material particulado de rocha fosfática em função do número de ciclos.

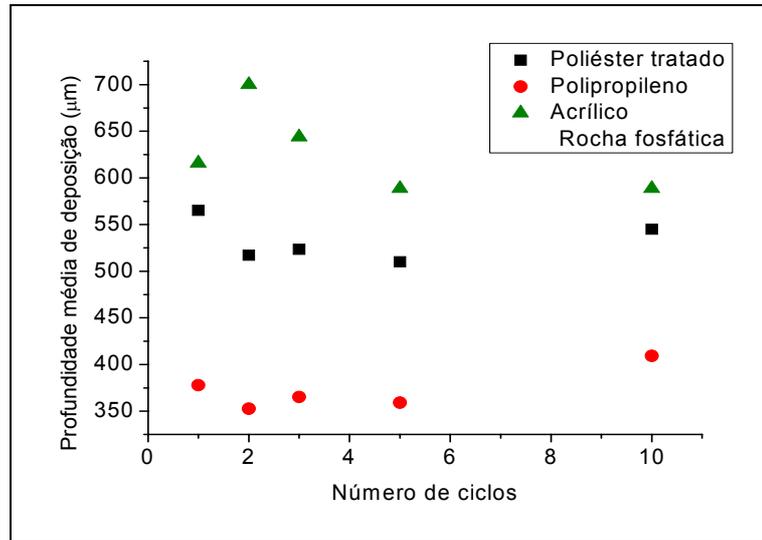


Figura 4.12: Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática para diferentes tipos de tecidos.

Através da análise da Figura 4.12, pôde-se constatar que o tecido de acrílico apresentou uma maior profundidade média de deposição das partículas em relação aos demais tecidos estudados. Isto indica que a maior permeabilidade ao ar ( $5,50 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ) e a maior porosidade superficial (0,77) do tecido, resultaram em maiores períodos de filtração interna, o que provocou a maior profundidade de deposição entre os tecidos. Já em relação ao polipropileno, este tecido apresentou uma baixa penetração das partículas no interior do meio filtrante. Isto provavelmente se deve ao fato da sua menor abertura entre as fibras e a menor permeabilidade ao ar ( $P=2,20 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ ), o que impede que as partículas penetrassem e alojassem mais intensamente no tecido, caracterizando um tecido de filtração superficial.

No caso do poliéster tratado, este tecido apresentou uma profundidade média de deposição das partículas intermediária entre os meios filtrantes estudados. Apesar das propriedades muito semelhantes ao do acrílico como visto na Tabela 3.2, a profundidade de deposição das partículas para este tecido foi menor. Isto mostra que a maior intensidade no tratamento superficial do tecido (chamuscagem/calandragem) conferiu uma estrutura mais fechada que o acrílico interferindo no processo de deposição das partículas no interior do tecido.

Quanto à distribuição granulométrica das partículas no interior do meio filtrante verificou-se que, para os três tecidos estudados com a rocha fosfática, as partículas de maior diâmetro concentraram-se na superfície do tecido, havendo uma tendência de diminuição com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. Em relação ao número de

ciclos, não foi possível observar nenhuma tendência clara sobre o diâmetro médio das partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

Desempenho muito semelhante foi encontrado por Rembor e Kasper (1996) que concluíram, a partir de seus experimentos, que variando o diâmetro das partículas, as partículas de menores diâmetros penetraram mais intensamente no interior do meio filtrante, em concordância com os resultados apresentados neste trabalho. Outros autores observaram o mesmo comportamento, em que a penetração de partículas no interior foi menos intensa quando se trabalhou com partículas de maiores diâmetros, sob condições experimentais semelhantes (THOMAS et al., 2001, DAVIS E KIM, 1999, LISOWSKI et. al., 2001, JAPUNTICH, et al, 1994, WALSH, 1996).

Entretanto, Martins (2001) concluiu que o diâmetro médio das partículas que se infiltraram no tecido foi maior que as que foram encontradas na superfície do tecido, diferentes aos encontrado neste trabalho. O autor justificou que as maiores partículas que infiltraram no tecido foram de difícil remoção na operação de limpeza, o que levou a média dos diâmetros a aumentar com aumento da profundidade.

Em relação ao número de partículas no interior do tecido, observou-se um comportamento semelhante para os três tecidos estudados, em que a maior concentração das partículas foi encontrada na superfície torta-ar, havendo uma tendência de diminuição exponencial com o adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, em concordância com o trabalho realizado por Thomas et al. (2001).

Constatou-se também que o tecido de polipropileno obteve o maior número de partículas remanescentes em sua superfície, variando entre 61 a 70% das partículas, seguido pelo acrílico com 42 a 65% das partículas e pelo poliéster tratado com 43 a 58% das partículas. Estudos realizados por Tognetti (2007) mostraram que o tecido de acrílico apresentou a maior área de torta removida, com tamanhos de pedaços de tortas superiores aos do tecido de polipropileno. Isto pode indicar que maiores forças de coesão e de adesão das partículas proporcionaram maiores áreas de tortas removidas, como pôde ser observado nos trabalhos de Callé et.al. (2001) e de Rodrigues (2004).

A fim de verificar qual a influência da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática nos tecidos estudados na perda de carga residual, construiu-se uma curva da perda de carga residual em função do número de ciclos, apresentada na Figura 4.13.

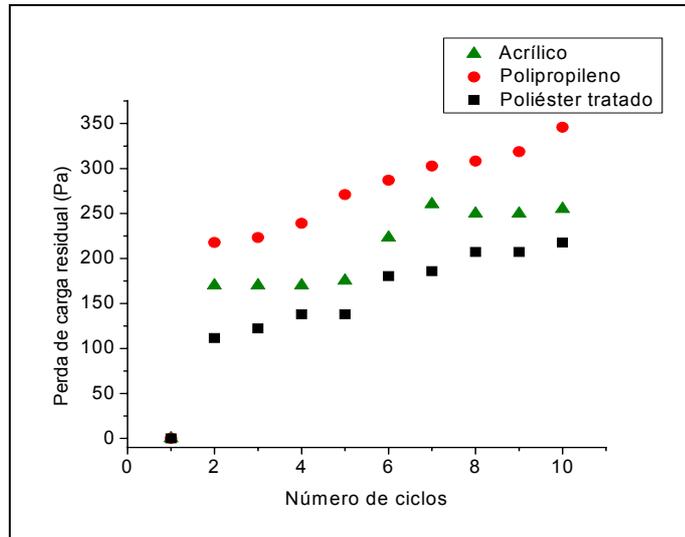


Figura 4.13: Perda de carga residual em cada ciclo de filtração para a rocha fosfática.

Nota-se que apenas a profundidade de deposição das partículas não seria suficiente para determinar um bom filtro. Analisando a Figura 4.13, verificou-se que, apesar do tecido de polipropileno apresentar a menor profundidade de deposição, como visto anteriormente, este tecido produziu o maior valor da perda de carga residual entre os tecidos estudados. Isto indica que além das tortas remanescentes no tecido, a perda de carga residual teve uma forte influência com as partículas depositadas internamente no tecido e com as características estruturais do meio filtrante.

Logo, as partículas capturadas entre as fibras mais fechadas do tecido de polipropileno provocaram uma maior obstrução dos poros e uma maior resistência à passagem de ar, contribuindo para o aumento da perda de carga residual em relação aos demais tecidos. Comportamentos similares foram verificados por Mauschitz et al. (2005), sendo que nos períodos iniciais da filtração, o tecido FM3, com tratamento superficial, apresentou uma maior perda de carga residual em relação ao tecido FM1, nas condições originais. Porém, após os 100 ciclos de filtração, o tecido FM1 foi o que apresentou a maior perda de carga residual. Isto explica que a grande quantidade de partículas alojadas dentro do tecido FM1 reduziu o volume de poros presentes no meio filtrante, criando uma barreira à passagem do ar, resultando em maiores valores na perda de carga residual do sistema.

Portanto, pode sugerir que as filtrações realizadas nestas condições experimentais apresentaram melhores resultados utilizando o tecido de poliéster tratado. Apesar deste tecido

proporcionar um dos maiores valores de profundidade média de deposição das partículas, foi o que apresentou a menor perda de carga residual entre os tecidos estudados. Isto mostra que, a maior profundidade de deposição nos períodos iniciais da filtração, não implicou nos entupimentos dos poros, mas numa distribuição mais homogênea das partículas no interior do meio filtrante. Isto garantiu ao tecido uma maior permeabilidade ao ar e uma menor resistência ao escoamento, o que resultou em menores perdas de cargas residuais, maiores períodos de filtração, tortas menos resistentes e uma maior eficiência de coleta de partículas, tornando este tecido vantajoso, econômico e com maior tempo de vida útil.

#### 4.6 DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA RESIDUAL TEÓRICA

Com o objetivo de avaliar os efeitos das partículas no desempenho dos filtros, determinaram-se através de um método semi-empírico, os valores da perda de carga residual encontrados para os meios filtrantes de poliéster tratado, polipropileno e acrílico, utilizando as partículas de rocha fosfática depositadas em cada um dos tecidos. Na realização destes cálculos utilizou-se o procedimento descrito na seção 3.5, que exigiu a obtenção dos volumes de partículas ocupados no meio filtrante obtidos através de um analisador de imagens no laboratório de controle ambiental da UFSCar. Com estes resultados determinou-se a porosidade do meio filtrante com a presença das partículas e, posteriormente, com a utilização da Equação de Ergun, obtiveram-se os valores teóricos da perda de carga residual após os processos de regeneração do tecido. Os resultados da perda de carga residual teórico e experimental estão apresentados na Tabela 4.4

Tabela 4.4: Resultados da perda de carga residual teórico e experimental.

	Perda de carga residual Teórico (Pa)			Perda de carga residual Experimental (Pa)		
	Acrílico	Polipropileno	Poliéster Tratado	Acrílico	Polipropileno	Poliéster Tratado
Ciclo 1	211	365	232	212	325	190
Ciclo 2	219	378	236	228	331	201
Ciclo 3	223	387	240	229	346	217
Ciclo 5	226	392	251	234	378	217
Ciclo 10	236	396	254	313	453	296

A partir dos resultados da Tabela 4.4, construiu-se a Figura 4.14, que compara as perdas de cargas teórica e experimental, em relação ao número de ciclos.

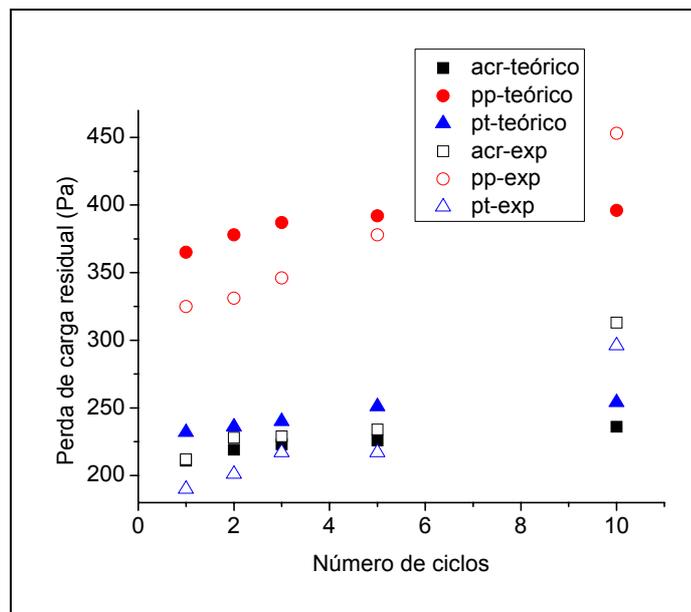


Figura 4.14: Comparativos da perda de carga residual experimental e teórica.

Analisando a Figura 4.14 observa-se que no decorrer dos ciclos de filtração ocorre um aumento da perda de carga residual experimental e teórica sem a tendência de estabilização. Isto evidencia que as partículas depositadas no interior do tecido podem estar obstruindo os poros dos tecidos e formando também tortas mais resistentes com aumento dos ciclos, contribuindo para o aumento da perda de carga residual. Mauschitz et al. (2007), realizando 3000 ciclos de filtração, confirmaram esta expectativa do aumento da perda de carga residual com o aumento no número de ciclos, sendo que as partículas depositadas no interior do tecido prejudicaram o desempenho do meio filtrante.

Para uma melhor visualização dos resultados das perdas de carga residuais experimentais e teóricas, construíram-se as Figuras 4.15, 4.16 e 4.17, para os tecidos de acrílico, de polipropileno e de poliéster tratado, respectivamente.

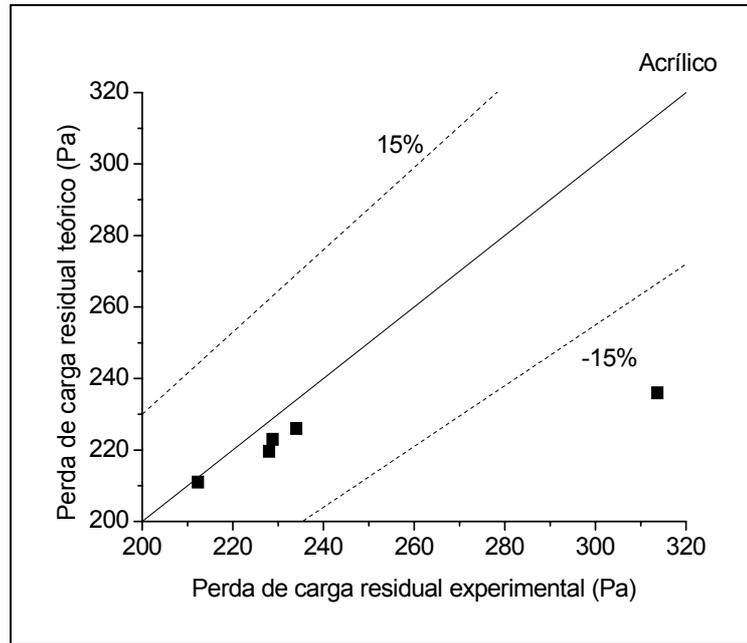


Figura 4.15: Eficiência teórica e experimental para o tecido de acrílico.

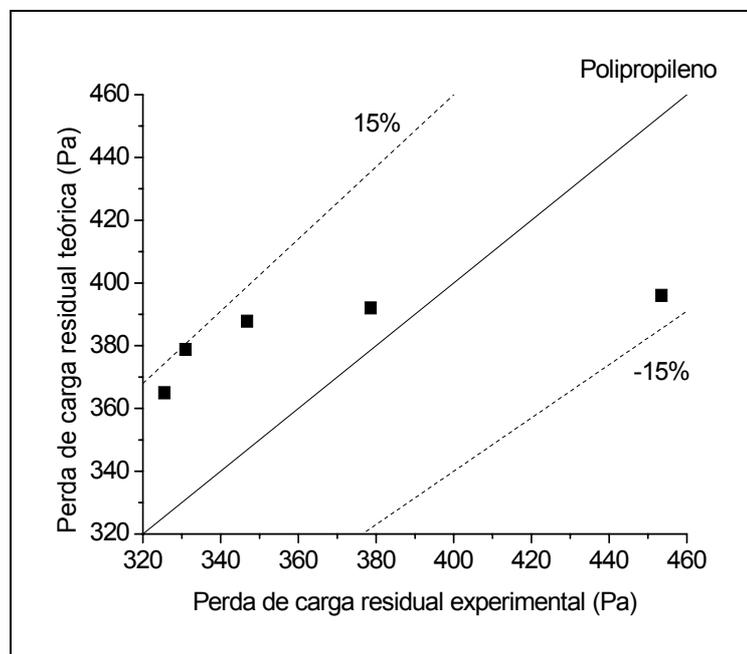


Figura 4.16: Eficiência teórica e experimental para o tecido de polipropileno.

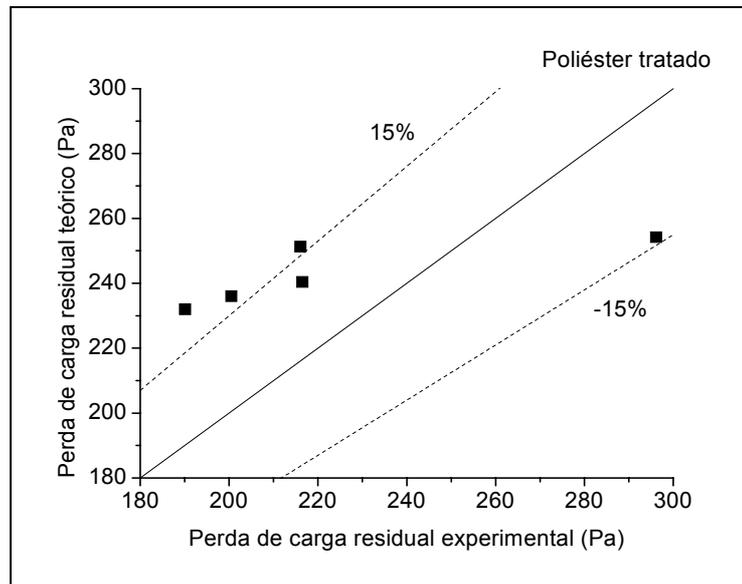


Figura 4.17: Eficiência teórica e experimental para o tecido de poliéster tratado.

Observa-se na Figura 4.15 que, para o tecido de acrílico, os valores da perda de carga residual teórico subestimaram os valores experimentais e o último ponto obteve desvios maiores que 15%. Já na Figura 4.16, para o tecido de polipropileno, os valores teóricos superestimaram os valores experimentais, exceto para o último ponto, em que o valor foi subestimado, ficando todos dentro dos desvios de 15%. E por fim, na Figura 4.17 os valores teóricos superestimaram os valores experimentais, exceto o último ponto, sendo que alguns valores apresentaram desvios maiores que 15%. Estes desvios podem estar provavelmente relacionados a erros experimentais na coleta de dados, na obtenção do volume das partículas ocupados no tecido, nos valores encontrados para porosidade do meio filtrante com a presença de partículas, da correlação utilizada para o cálculo que foi desenvolvido para diferentes condições experimentais, entre outros fatores.

Logo, um grande aumento das partículas depositadas no interior do meio filtrante com o aumento do número de ciclos provocou um aumento na perda de carga residual. Sendo assim, um tratamento adequado na superfície do tecido, evitaria uma deposição excessiva de partículas no interior do tecido diminuindo a perda de carga residual, tornando a operação economicamente vantajosa, com ciclos de filtração mais longos.

Nos próximos itens serão apresentados os estudos realizados com as partículas de polvilho doce nos tecidos de poliéster tratado e poliéster sem tratamento.

#### 4.7 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE POLVILHO DOCE NO TECIDO DE POLIÉSTER TRATADO

Os experimentos com poliéster tratado também foram realizados utilizando o polvilho doce como material particulado, possibilitando uma avaliação mais ampla do efeito da forma da partícula sobre a filtração e a remoção da torta. As imagens das partículas remanescentes na torta de filtração e no interior do meio filtrante, após a operação de limpeza do tecido estão apresentadas na Figura 4.18. Estas fotografias foram geradas no microscópio óptico (MO), mostrando a seção transversal do tecido de poliéster tratado com as partículas de polvilho doce depositadas no interior desse meio filtrante.

Para o polvilho doce, nota-se que não foram encontradas as variações do diâmetro médio das partículas com a profundidade de deposição e com o número de ciclos, devido ao fato deste material apresentar praticamente partículas monodispersas em sua distribuição granulométrica.

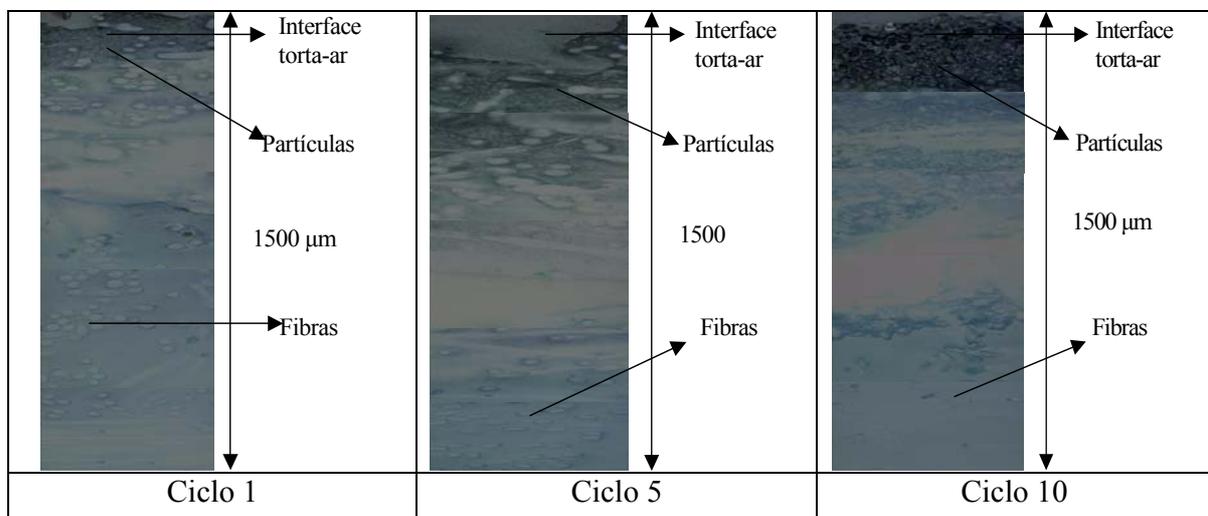


Figura 4.18: Seção transversal do filtro de poliéster tratado e polvilho doce em diferentes ciclos (aproximadamente 1500  $\mu\text{m}$  da superfície do tecido com um aumento de 200 vezes).

Pode-se notar na Figura 4.18 que as partículas ficaram retidas próximas à superfície do tecido. Isto mostra que o tratamento superficial (chamuscagem/calandragem) impediu que uma maior quantidade de partículas penetrassem intensamente no interior do filtro.

Com o objetivo de avaliar a quantidade de partículas de polvilho doce alojadas no tecido de poliéster tratado, construíram-se curvas do número médio de partículas em função do número adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, para cada faixa do tecido analisado, apresentadas na Figura 4.19.

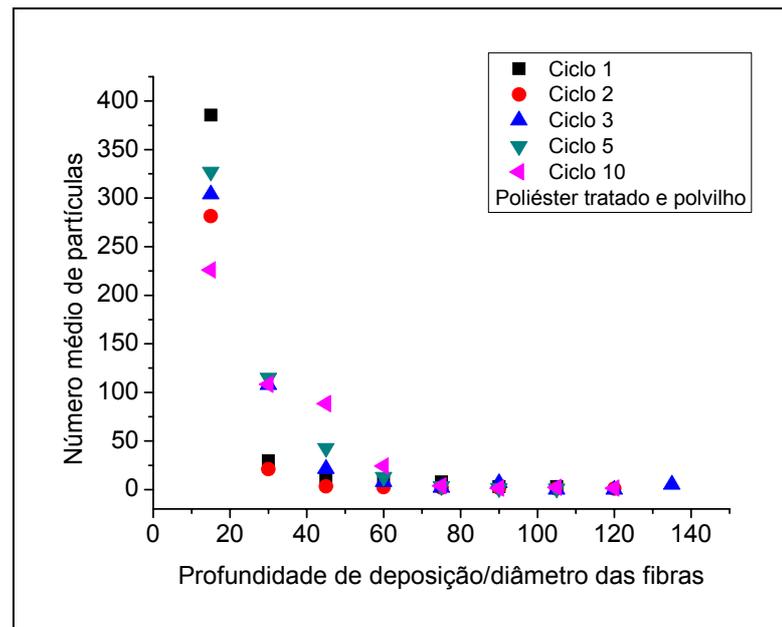


Figura 4.19: Comportamento do número médio de partículas de polvilho doce no tecido de poliéster tratado em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Verifica-se na Figura 4.19 que o maior número de partículas foi encontrado na superfície torta-ar, que variou entre 49 a 85 %, havendo uma diminuição exponencial de partículas com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. Observou-se também que os resultados obtidos para o número de partículas, apresentaram um alinhamento dos pontos em uma mesma curva, como já verificado com a rocha fosfática. Em relação ao número de ciclos não se observou tendência da quantidade de partículas aumentar ou diminuir com os ciclos.

Os resultados da profundidade média de deposição das partículas de polvilho doce no tecido de poliéster tratado estão apresentados na Tabela 4.5. Como foram analisados 10 perfis transversais do filtro, realizou-se uma média da profundidade de deposição das partículas para cada ciclo analisado.

Tabela 4.5: Profundidade média de deposição das partículas de polvilho doce no tecido de poliéster tratado.

<b>CICLO</b>	<b>PROFUNDIDADE MÉDIA DE DEPOSIÇÃO (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>
1	1448,9	374,19
2	1983,4	436,45
3	1315,9	534,23
5	1411,1	303,83
10	1814,2	483,22

Observa-se na Tabela 4.5 que a profundidade média de deposição das partículas variou entre 1315,9  $\mu\text{m}$  a 1983,4  $\mu\text{m}$ . Isto mostra que as diferentes características atribuídas no tratamento superficial do tecido de poliéster tratado, como a menor permeabilidade ao ar ( $5,90 \cdot 10^{-8} \text{m}^2$ ) e menor porosidade superficial (0,76), foram de grande importância na estrutura das fibras, evitando que uma grande quantidade de partículas de polvilho doce penetrassem e alojassem no interior deste tecido em comparação ao tecido de poliéster sem tratamento.

#### **4.8 ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE POLVILHO DOCE PARA O TECIDO DE POLIÉSTER NÃO TRATADO**

Com a intenção de comparar o efeito do tratamento superficial sobre o tecido, realizaram-se ensaios de filtração para o tecido de poliéster não tratado utilizando o polvilho doce.

As imagens das partículas remanescentes na torta e no interior do meio filtrante, após a operação de limpeza estão apresentadas na Figura 4.20. Estas fotografias foram geradas no MO, mostrando a seção transversal deste tecido de poliéster não tratado com as partículas de polvilho doce depositadas no interior em seu interior.

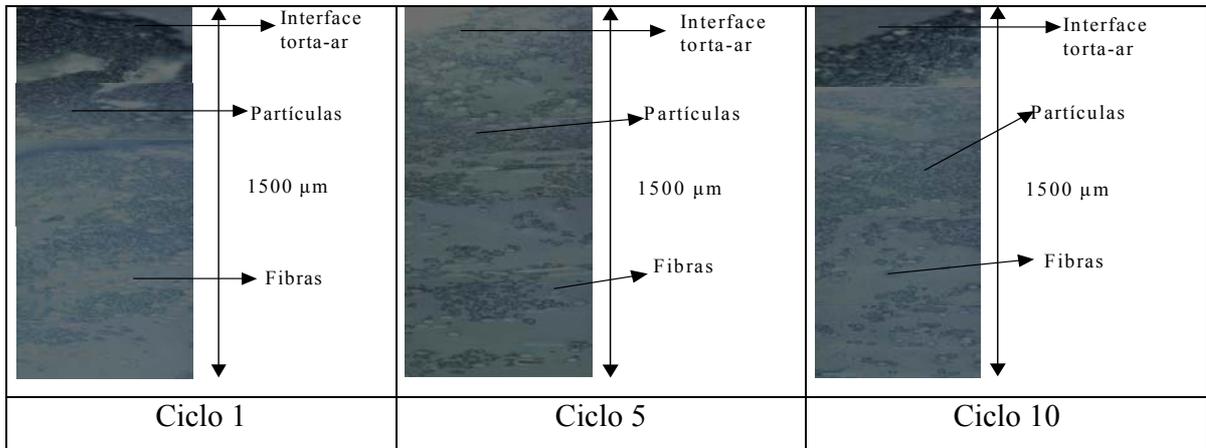


Figura 4.20: Seção transversal do filtro de poliéster não tratado e polvilho doce em diferentes ciclos (aproximadamente 1500 μm da superfície do tecido com um aumento de 200 vezes).

Como pode ser visto na Figura 4.20, este tecido apresentou uma maior quantidade de partículas retidas no interior do meio filtrante em relação ao poliéster tratado como visto na Figura 4.18. Isto mostra que, o não tratamento da superfície ocasionou um maior período de filtração interna, facilitando que as partículas penetrassem mais intensamente no interior do tecido.

Com o objetivo de verificar o comportamento da quantidade de partículas retidas no meio filtrante, construíram-se curvas do número médio de partículas em função do número adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, para cada faixa do tecido analisado, apresentado na Figura 4.21.

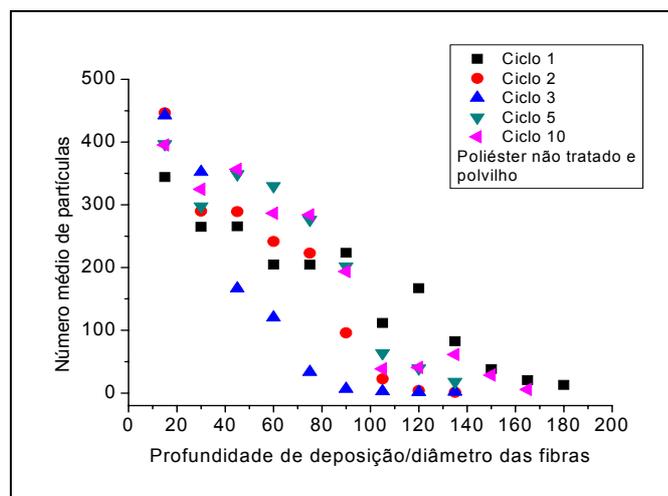


Figura 4.21: Comportamento do número médio de partículas de polvilho doce no tecido de poliéster não tratado em relação ao adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras.

Analisando a Figura 4.21, pode-se observar que o número médio de partículas na superfície do tecido variou entre 17 a 39 %, diminuindo com o adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras. Nota-se que este tecido apresentou um maior acúmulo de partículas no interior deste meio filtrante em relação ao tecido de poliéster tratado. Isto mostra que a maior permeabilidade ao ar ( $9,40 \cdot 10^{-8} \text{m}^2$ ) e o maior espaçamento entre as fibras, proporcionaram um maior período de filtração interna e um maior acúmulo de partículas no interior do meio filtrante. Verificou-se também que os resultados obtidos para o número de partículas, não apresentaram um alinhamento dos pontos em uma mesma curva, e sim uma dispersão destes pontos, em relação ao poliéster tratado, indicando que há uma maior quantidade de partículas acumuladas no interior do tecido. Já em relação ao número de ciclos não se observou nenhuma tendência da quantidade de partículas aumentar ou diminuir com os ciclos.

Os resultados da profundidade média de deposição das partículas de polvilho doce no tecido de poliéster não tratado estão apresentados na Tabela 4.6. Como para cada ciclo foram analisados 10 perfis transversais do filtro realizou-se uma média da profundidade de deposição das partículas para cada ciclo analisado.

Tabela 4.6: Profundidade média de deposição das partículas do polvilho doce no tecido de poliéster não tratado.

<b>CICLO</b>	<b>PROFUNDIDADE MÉDIA DE DEPOSIÇÃO (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>DESVIO PADRÃO</b>
1	2565,7	786,83
2	2394,4	382,98
3	2042,2	391,94
5	2496,3	635,48
10	3126,4	293,66

Na Tabela 4.6 verificou-se que, em alguns casos, do tecido de poliéster não tratado, a penetração das partículas ocorreu até a última camada, com um número considerável de partículas, o que pode indicar que houve um possível atravessamento destas partículas através do

filtro, evidenciando uma baixa eficiência de captura deste tecido. Isto mostra que o não tratamento da superfície do tecido permitiu que as partículas de polvilho doce penetrassem mais intensamente no interior do tecido, provocando um maior acúmulo de partículas e uma maior profundidade média de deposição como foi observado através dos resultados obtidos.

Na próxima seção serão apresentadas as comparações da profundidade de deposição das partículas nos tecidos de poliéster tratado e sem tratamento com o polvilho doce e também a influência destes resultados na perda de carga residual do processo.

#### 4.9 COMPARAÇÃO DA DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE POLVILHO DOCE NOS TECIDOS DE POLIÉSTER TRATADO E POLIÉSTER SEM TRATAMENTO

Através destes experimentos desejou-se analisar a influência do tratamento do filtro na profundidade de deposição das partículas no interior do meio filtrante. A Figura 4.22 apresenta as comparações dos resultados obtidos da profundidade média das partículas em função do número de ciclos para o poliéster tratado e poliéster não tratado.

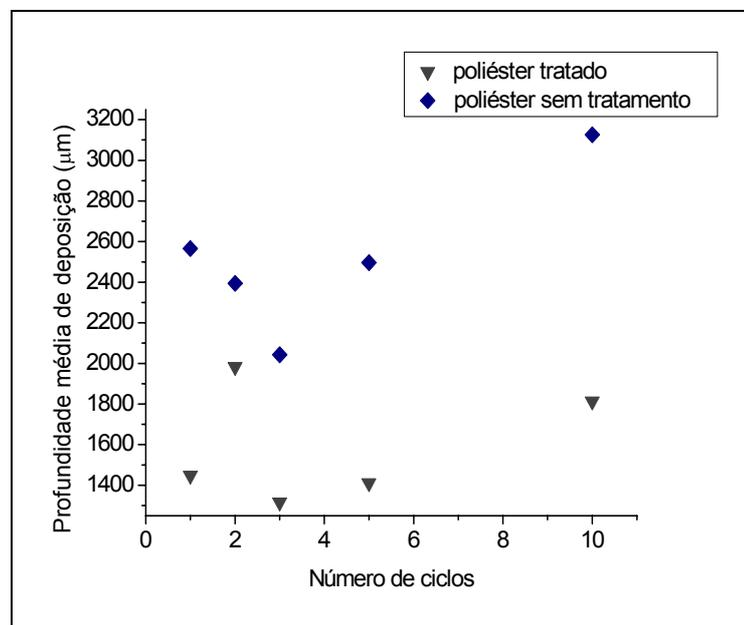


Figura 4.22: Profundidade média de deposição de partículas de polvilho doce nos tecidos de poliéster tratado e sem tratamento.

Fazendo a análise da Figura 4.22 observa-se que no tecido sem tratamento a profundidade de penetração foi maior em relação ao tecido tratado. Isto leva a conclusão que a ausência do tratamento permite que as partículas penetrem mais intensamente no interior do meio filtrante, ocasionando um maior período de filtração interna, menores eficiências de remoção destas partículas e menores tempo de vida útil do meio filtrante. Verificou-se também que em alguns casos do tecido de poliéster sem tratamento que a penetração das partículas de polvilho foi tão elevada que se pode considerar que houve uma penetração total através do tecido.

Tratando-se do número de partículas, observou-se, para o tecido de poliéster tratado, que o maior número de partículas ficou concentrado na superfície do tecido, que variando entre 49 a 85%, havendo uma tendência de diminuir com o aumento do adimensional da profundidade de deposição/diâmetro das fibras, como visto na Figura 4.19. Já em relação ao tecido sem tratamento a proporção de retenção de partículas na superfície foi bem menor em relação ao poliéster tratado variando entre 17 a 39%, como visto na Figura 4.21. Observou-se também que o poliéster sem tratamento apresentou um maior número de partículas no interior do meio filtrante em relação ao poliéster tratado. Isto mostra que o tratamento da superfície impediu que as partículas penetrem intensamente no meio filtrante, sendo elas capturadas principalmente na superfície do tecido.

Com o objetivo de verificar a influência da profundidade de deposição das partículas de polvilho doce nos tecidos estudados na perda de carga residual, construiu-se uma curva da perda de carga residual em função do número de ciclos que está apresentado pela Figura 4.23.

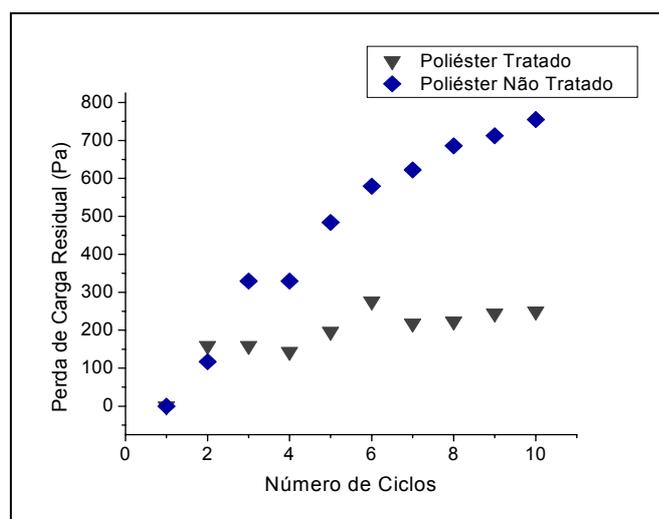


Figura 4.23: Perda de carga residual em cada ciclo de filtração para o polvilho doce.

A partir da análise da Figura 4.23, observa-se que o tecido de poliéster sem tratamento atingiu valores superiores de perda de carga residual em relação ao tecido de poliéster tratado a partir do terceiro ciclo. Isto mostra que, o grande acúmulo e a maior profundidade de deposição das partículas adquiridas pelo tecido sem tratamento, causaram uma obstrução dos poros e uma grande resistência à passagem do ar, aumentando a perda de carga residual do sistema. Sabe-se que estas partículas depositadas no interior destas fibras são de difícil remoção. Estes valores elevados da perda de carga residual prejudicam o tempo de vida útil do tecido, já que o mesmo deve ser substituído para que a queda de pressão esteja dentro dos limites práticos de operação.

Comportamentos similares foram encontrados por Mauschitz et al. (2005), mostrando que o não tratamento na superfície do tecido permitiu que uma grande quantidade de partículas fosse depositada no interior do meio filtrante. Esta deposição proporcionou uma grande redução da porosidade superficial nas diversas profundidades do tecido, aumentando a resistência à passagem do ar e conseqüentemente ocorre um aumento da perda de carga residual.

Dessa forma, pode-se concluir que o tratamento superficial do tecido é de fundamental importância, pois não permite que as partículas penetrem intensamente no tecido, realizando uma rápida formação da torta de filtração e grande acúmulo de partículas na superfície do tecido facilitando o processo de limpeza. Isto resultou ao tecido, menores valores de perda de carga residual e menor acúmulo de partículas, sendo o poliéster tratado o mais indicado para a realização dos ensaios com o polvilho.

#### **4.10 COMPARAÇÃO ENTRE A DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA E POLVILHO DOCE NO TECIDO DE POLÍESTER TRATADO**

Com intuito de avaliar os efeitos do tipo de material particulado sobre a profundidade de deposição foram realizados um estudo com as partículas de rocha fosfática e o polvilho doce no tecido de poliéster tratado. Os resultados da profundidade de deposição estão apresentados na Figura 4.24.

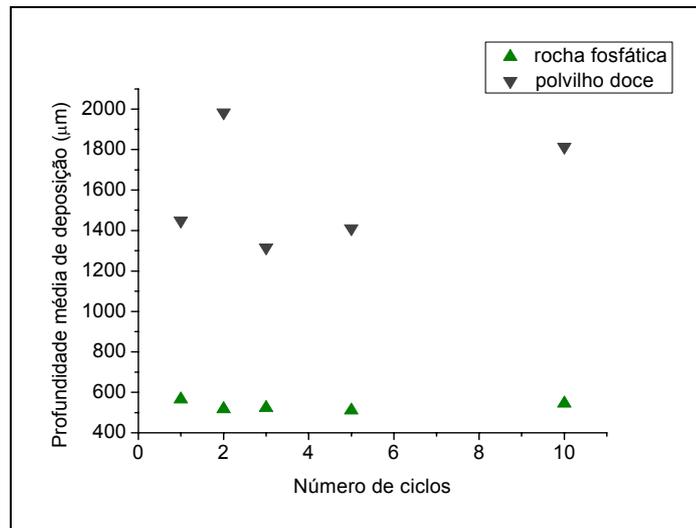


Figura 4.24: Profundidade média de deposição das partículas de rocha fosfática e polvilho doce no tecido de poliéster tratado.

Verifica-se na Figura 4.24 que a profundidade de deposição das partículas de polvilho doce foi superior aos encontrados para a rocha fosfática, no tecido de poliéster tratado. Isto se deve ao fato das partículas de polvilho doce apresentarem um formato quase esférico, permitindo que ocorresse uma melhor acomodação destas no conjunto torta-tecido, tornando-se os períodos de filtração interna maiores, o que mostra a grande importância da característica do material particulado.

Em relação à quantidade de partículas depositadas no tecido, observou um maior número de partículas de rocha fosfática em relação às partículas de polvilho doce para cada camada analisada no tecido, como visto nas Figuras 4.11 e 4.21 respectivamente. Estudo realizado por Lucas (2000) mostrou que as tortas formadas pelo polvilho doce propiciaram uma remoção de aproximadamente 90%, enquanto as tortas com a rocha fosfática, a remoção da torta atingiu apenas 60%. O autor verificou que a maior espessura da torta formada pelo polvilho doce, permitiu uma remoção mais rápida e eficiente do tecido.

Estes maiores destacamentos das tortas de filtração podem estar relacionados com as diferenças nas forças de adesão e coesão das partículas. Estudos realizados por Felicetti et al. (2006) observaram que o material orgânico (polvilho doce) apresentou maiores valores de força de adesão em relação ao material inorgânico (rocha fosfática), tanto para o substrato de aço inoxidável quanto para o vidro. Ito (2002) observou que as partículas de polvilho doce

apresentaram menores porosidades de torta em relação às partículas de rocha fosfática, indicando que as tortas formadas com o polvilho doce podem estar mais coesas. Estas maiores forças de adesão e coesão permitiram que as partículas depositadas na superfície-tecido fossem destacadas em maiores blocos, reduzindo o número de partículas de polvilho doce na superfície do tecido.

A fim de verificar qual a influência da profundidade de deposição das partículas de rocha fosfática nos tecidos estudados na perda de carga residual, construiu-se uma curva da perda de carga residual em função do número de ciclos, apresentada na Figura 4.25.

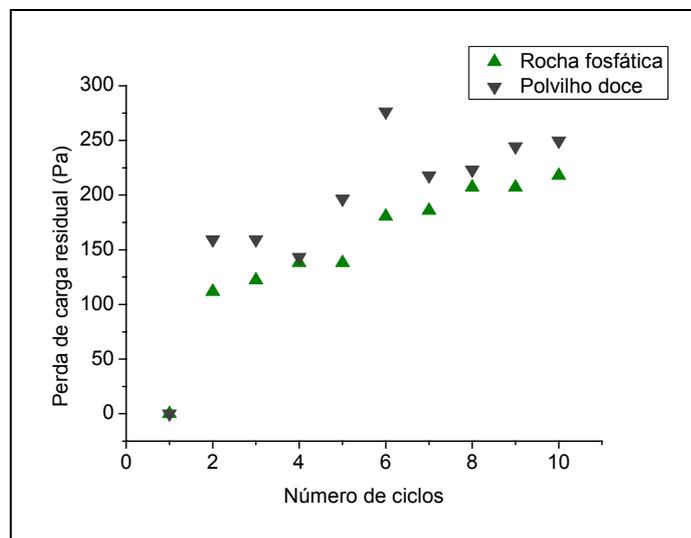


Figura 4.25: Perda de carga residual em cada ciclo de filtração para o tecido de poliéster tratado.

Analisando a Figura 4.25, observa-se que apesar do polvilho apresentar uma maior profundidade de deposição das partículas em relação à rocha fosfática, a perda de carga residual foi somente um pouco superior ao encontrado para a rocha fosfática. Isto indica que a menor quantidade de partículas no interior do meio filtrante, a distribuição granulométrica mais estreita e formato quase esférico, levaram a uma melhor acomodação das partículas no tecido de tal forma a não obstruir os espaços inter-partículas, proporcionando uma menor resistência à passagem do ar e tortas menos resistentes.

Portanto pode-se concluir que não apenas as características dos meios filtrantes interferem nos processos de formação e remoção de tortas, mas também os diferentes tipos de materiais particulados empregados.

#### 4.11 ESTUDO DO EFEITO DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS NA PROFUNDIDADE DE DEPOSIÇÃO DAS PARTÍCULAS NO TECIDO DE POLIÉSTER TRATADO

Para analisar a influência das variáveis operacionais sobre a profundidade de deposição, realizaram-se ensaios de filtração para diferentes velocidades de filtração e tempos de filtração, obtida através do planejamento de experimentos, sem a operação de limpeza. Os comportamentos destes ensaios de filtração para os tempos de 400 s, 800 s e 1200 s estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 4.26 a 4.28.

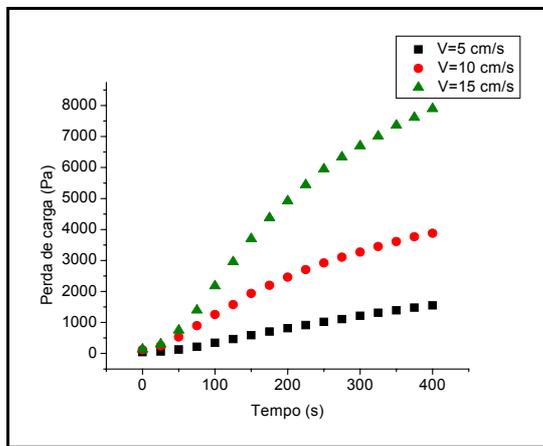


Figura 4.26: Comportamento da curva de filtração para tempo 400 s.

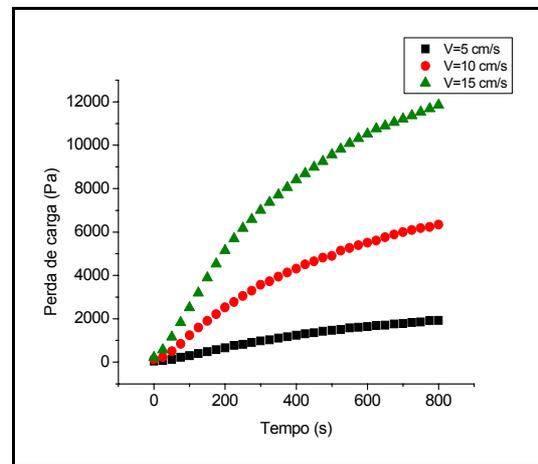


Figura 4.27: Comportamento da curva de filtração para tempo 800s.

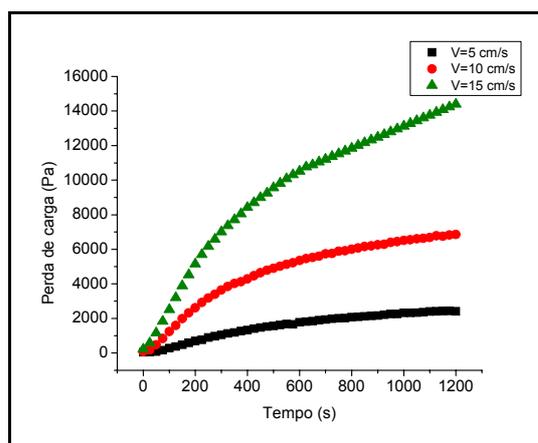


Figura 4.28: Comportamento da curva de filtração para tempo de 1200 s.

A análise das curvas de filtração das Figuras 4.26; 4.27 e 4.28 mostram que o aumento da velocidade de filtração superficial provoca um aumento da perda de carga do sistema. Nota-se também que à medida que ocorre um aumento da velocidade de filtração, a curva de filtração torna-se mais convexa nos períodos iniciais da filtração, indicando que pode estar ocorrendo um maior período de filtração interna no tecido e um aumento na penetração das partículas no interior do meio filtrante. Este acúmulo de material no tecido pode estar ocasionando um aumento na resistência à passagem do ar, proporcionando um aumento da perda de carga residual do sistema.

Os resultados da profundidade média de deposição das partículas, utilizando um planejamento fatorial  $3^k$ , com a investigação das variáveis: velocidade de filtração e tempo de filtração estão apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Matriz com os valores dos ensaios de filtração com os resultados da profundidade de deposição das partículas.

Ensaio	$V_f$ (m/s)	t (s)	Profundidade média de deposição ( $\mu\text{m}$ )	Desvio Padrão
1	0,05	400	129	25,82
2	0,05	800	174	43,97
3	0,05	1200	219	32,16
4	0,10	400	262	36,46
5	0,10	800	320	33,57
6	0,10	1200	430	31,74
7	0,15	400	500	50,36
8	0,15	800	604	109,81
9	0,15	1200	786	111,18

As estimativas dos efeitos das variáveis operacionais investigadas na operação estão apresentadas na Tabela 4.8, sendo estes valores considerados estatisticamente significativos ao nível de significância de 5 %.

Tabela 4.8: Estimativa dos efeitos das variáveis para a profundidade média de deposição.

	Efeito	Erro padrão	t(3)	p-valor	Lim.Conf. -95%	Lim.Conf. +95%
<b>Média</b>	380,44	4,940	77,000	0,000005	364,720	396,168
<b>(1) <math>V_f</math> (m/s) (<math>L^*</math>)</b>	456,00	12,102	37,678	0,000041	417,484	494,515
<b><math>V_f</math> (m/s) (<math>Q^{**}</math>)</b>	-64,66	10,481	-6,169	0,008571	-98,022	-31,311
<b>(2) <math>t_f</math> (s) (<math>L^*</math>)</b>	181,33	12,102	14,983	0,000645	142,818	219,848
<b><math>t_f</math> (s) (<math>Q^{**}</math>)</b>	-21,66	10,481	-2,067	0,130588	-55,022	11,688
<b>(<math>1L^*</math>) x (<math>2L^*</math>)</b>	98,00	14,822	6,611	0,007045	50,828	145,171

\* termo linear      \*\* termo quadrático

A partir da análise da Tabela 4.8 nota-se que as variáveis significativas encontradas para a profundidade de deposição das partículas, foram os termos lineares para a  $V_f$  e  $t_f$  ( $p < 0,05$ ), o termo quadrático da  $V_f$  ( $p < 0,05$ ) e a interação entre a  $V_f(L)$  e o  $t_f(L)$  ( $p < 0,05$ ).

As estimativas dos efeitos destas variáveis operacionais podem ser visualizadas também através do diagrama de Pareto representada através da Figura 4.29.

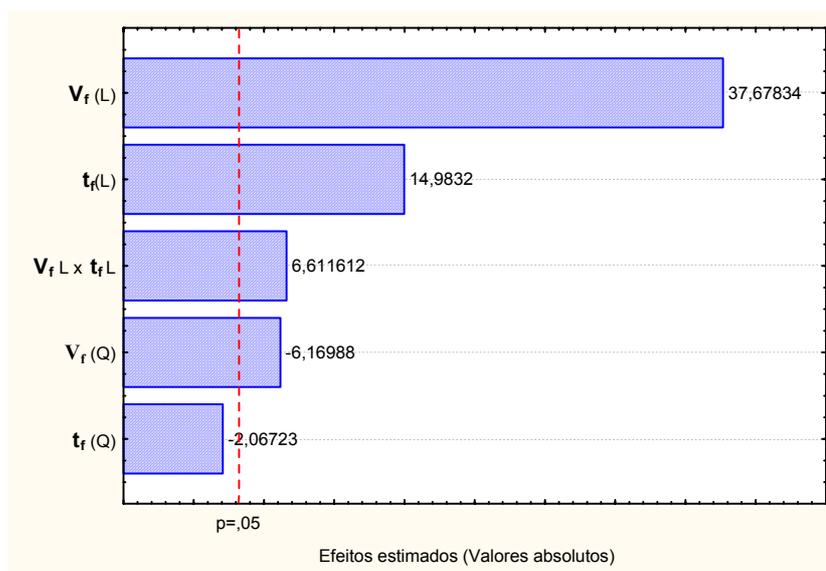


Figura 4.29: Diagrama de Pareto.

Através da análise da Figura 4.29, pode-se observar que, ambas as variáveis foram significativos na profundidade de deposição, sendo que a velocidade de filtração apresentou um maior efeito entre as variáveis estudadas.

Os valores dos coeficientes de regressão para a profundidade média de deposição das partículas foram determinados em nível de significância de 5%, e estão apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Coeficiente de regressão para a profundidade média de deposição das partículas.

	<b>Coeficiente de regressão</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>t(3)</b>	<b>p-valor</b>	<b>Lim.Conf. -95%</b>	<b>Lim.Conf. +95%</b>
<b>Média</b>	322,8889	11,04797	29,22609	0,000088	287,7293	358,0485
<b>(1) Vf (m/s) (L)</b>	228,0000	6,05122	37,67834	0,000041	208,7423	247,2577
<b>Vf (m/s) (Q)</b>	64,6667	10,48102	6,16988	0,008571	31,3114	98,0220
<b>(2) t<sub>f</sub> (s) (L)</b>	90,6667	6,05122	14,98320	0,000645	71,4090	109,9244
<b>t<sub>f</sub> (s) (Q)</b>	21,6667	10,48102	2,06723	0,130588	-11,6886	55,0220
<b>(1L) x (2L)</b>	49,0000	7,41120	6,61161	0,007045	25,4142	72,5858

O exame dos resíduos é fundamental, para que se possa avaliar a qualidade do ajuste de qualquer modelo. Em primeiro lugar, os resíduos devem ser pequenos. Se um determinado modelo deixa resíduo considerável, ele é um modelo ruim. No modelo ideal, todas as previsões coincidiriam exatamente com as respostas observadas, e não haveria resíduo nenhum. O método mais usado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo é a análise de variância. Para estes resultados construiu-se uma tabela para a análise de variância (ANOVA) que está apresentada na Tabela 4.10.

Para avaliar se a equação de regressão é estatisticamente significativa, é possível demonstrar através do cálculo da distribuição F. O cálculo para o valor de  $F_{Cal}$  é realizado através da razão entre as médias quadráticas  $MQ_{Regressão}$  (média dos quadrados da regressão) e  $MQ_{resíduo}$  (média dos quadrados do resíduo), bastando compará-lo com o valor tabelado de  $F_{Tab}(gl_R, gl_r, \alpha)$ ,

sendo  $gl_R$ : graus de liberdade da regressão,  $gl_r$ : graus de liberdade dos resíduos e  $\alpha$ : nível de significância desejado.

Se verificar que  $F_{Cal} > F_{Tab}(gl_R, gl_r, \alpha)$ , tem-se então evidência estatística suficiente para nos fazer acreditar na existência de uma relação entre as variáveis. Uma regra prática que se pode empregar é considerar a regressão como útil para fins de previsão se o valor de  $F_{Cal}$ , for pelo menos, cerca de dez vezes o valor do ponto da distribuição F com o número apropriado de graus de liberdade, no nível de confiança escolhido (NETO et.al., 2002).

Tabela 4.10: Análise de variância para a profundidade média de deposição.

Fonte de variação	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{Cal}$
<b>Regressão</b>	380133,2	5	194868,6	886,98
<b>Resíduo</b>	659,1	3	219,7	
<b>Total</b>	380792,2	8		

A Tabela 4.10 mostra, através do teste F, que o valor encontrado para  $F_{Cal} = 886,98$  foi muito superior ao valor encontrado para o  $F_{Tab}(5;3;0,05) = 9,01$ , sendo o modelo encontrado altamente significativo e adequado para descrever os resultados através da superfície de resposta. A partir destes resultados obtidos foi possível obter um modelo de 2ª ordem para as variáveis analisadas e verificar a validade do modelo ajustado para a profundidade de deposição, apresentada através da Equação 4.1, com o coeficiente de determinação de 99,82%. Esses resultados indicam uma boa concordância entre os valores experimentais e previstos pelo modelo, nas condições experimentais estudadas, sendo visualizada através da Figura 4.30.

$$P = 322,89 + 228.V_f + 90,67.t_f + 64,67.V_f^2 + 49.V_f.t_f \quad (4.1)$$

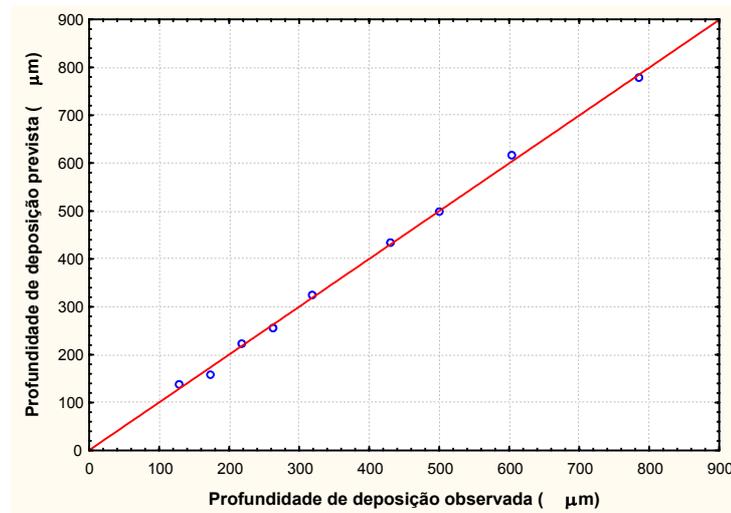
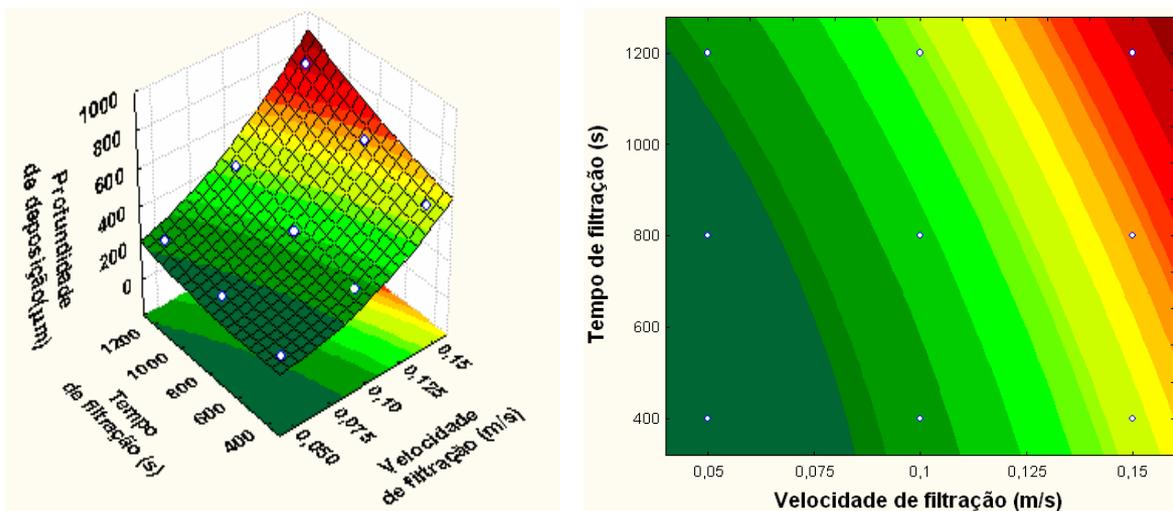


Figura 4.30: Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo para a profundidade média de deposição.

Com objetivo de visualizar melhor o efeito das variáveis do processo na profundidade de deposição, construiu-se a superfície de resposta e a curva de contorno, visualizada através da Figura 4.31.



(a)

(b)

Figura 4.31: (a) Superfície de resposta e (b) curva de contorno para a profundidade média de deposição das partículas em função da velocidade de filtração e do tempo de filtração.

Nota-se na Figura 4.31, da superfície de resposta, que a profundidade de deposição das partículas foi mais sensível às variações apresentadas na velocidade de filtração. À medida que

ocorreu um aumento na velocidade e no tempo de filtração ocorreu um aumento na profundidade de deposição, sendo a velocidade de filtração o parâmetro que apresentou um maior efeito significativo na variável resposta desejada. Observou-se que para baixas velocidades de filtração o tempo de filtração não obteve nenhuma influência na profundidade de deposição, sendo necessário maiores valores de velocidades para começar a observar a influência da variável tempo.

Comportamentos similares foram observados por Martins (2001) em que a profundidade de deposição no interior do tecido foi maior para as maiores velocidades de filtração, mostrando que esta variável foi influente na profundidade de deposição. Já Thomas et al. (2001), realizando estudos de deposição de partículas para diferentes tempos de filtração, de 10 min e 25 min, observaram que a profundidade de deposição das partículas para o tempo de filtração de 10 min foi um pouco inferior ao encontrado para o tempo de 25 min. Isto indica que a partir da existência da torta, a penetração através do tecido tende-se a se tornar constante, o que levou o tempo de filtração a ter pouca influência na profundidade de deposição.

Portanto, quando se deseja obter menores níveis da profundidade de deposição das partículas, sugere-se a utilização de baixas velocidades de filtração e menores tempos de filtração, sabendo-se que as partículas depositadas no interior destas fibras são de difícil remoção e provocam uma redução nos poros presentes no meio, aumentando a perda de carga residual como já visto anteriormente. Estes elevados valores de perda de carga residual prejudicam o tempo de vida útil do tecido, já que o mesmo deve ser substituído para que a queda de pressão operacional esteja dentro dos limites práticos de operação.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem apresentar as seguintes conclusões:

- Quanto à distribuição granulométrica nos ensaios realizados para a rocha fosfática, verificou-se que os maiores diâmetros das partículas ficaram retidos na superfície do tecido, enquanto que as de menor tamanho penetraram mais intensamente no tecido.
- Em relação ao número de partículas também para a rocha fosfática, observou-se que a maior quantidade de partículas ficaram concentradas na superfície do tecido, diminuindo com o aumento da profundidade de deposição.
- O maior número de partículas na superfície utilizando as partículas de rocha fosfática foi encontrada para o tecido de polipropileno, seguido do acrílico e do poliéster tratado.
- A menor profundidade de deposição utilizando as partículas de rocha fosfática foram obtidas para o tecido de polipropileno, porém esta menor profundidade de deposição não significou em menor perda de carga residual.
- As partículas alojadas no interior do polipropileno proporcionaram uma redução nos volumes de poros existentes, aumentando a perda de carga residual nos períodos iniciais da filtração.
- O tecido que apresentou melhores resultados nos ensaios com a rocha fosfática foi o tecido de poliéster tratado, pois apesar de apresentar a maior da profundidade de deposição, foi o tecido obteve menores perdas de carga residual nos ciclos iniciais da filtração.
- Analisando a superfície do tecido utilizado em ensaios com as partículas de polvilho, notou-se que o poliéster sem tratamento permitiu uma maior deposição das partículas no interior do meio filtrante, mostrando a importância do tratamento da superfície do tecido.

- As maiores profundidades de deposição das partículas do polvilho doce foram encontradas no poliéster não tratado, e conseqüentemente os maiores valores de perda de carga residual, porque as partículas depositadas no interior do tecido são de difícil remoção, diminuem a porosidade nas camadas internas do tecido e obstruem a passagem do ar.
- Comparando a utilização de pós de rocha fosfática e polvilho doce, observou-se que apesar do polvilho doce produzir uma maior profundidade de deposição, os valores de perda de carga residual foram apenas um pouco superiores aos da rocha fosfática, mostrando que as características das partículas, como o formato e a distribuição granulométrica, influenciaram nos ensaios de filtração.
- Em relação à quantidade de partículas depositadas no tecido para diferentes materiais particulados, observou um maior número de partículas de rocha fosfática em relação às partículas de polvilho doce para cada camada analisada no tecido.
- No planejamento de experimentos, verificou-se que tanto a velocidade de filtração quanto o tempo de filtração foram estatisticamente significativos nos efeitos da profundidade de deposição.
- Quando se deseja obter menores profundidades de deposição de partículas sugere-se a utilização de baixos valores de velocidades de filtração e baixos valores de tempos de filtração.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como prosseguimento dos estudos realizados neste trabalho ainda existem alguns aspectos importantes a serem investigados, tais como:

- Estimar propriedades, como a porosidade da torta remanescente no tecido, através de microfotografias do tecido.
- Trabalhar com diferentes diâmetros de partículas para investigar o efeito da variável na profundidade de deposição.
- Realizar estudos experimentais para determinação da força de adesão para os tecidos estudados.
- Realizar uma maior quantidade de ciclos de filtração e limpeza, analisando o comportamento da profundidade de deposição, do número de partículas, da massa residual depositada e da perda de carga residual para os tecidos estudados.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M.L. **Filtração de ar em filtros de tecido**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 1991.

AGUIAR, M.L. **Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 1995.

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

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

BILLINGS, C.E.; WILDER, J. **Handbook of fabric filter technology – Fabric filter system study**. Volume I. GCA Corporation, Bedford, Massachusetts December, 1970.

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

CALLÉ, S., BÉMER, D., THOMAS, D., CONTAL, P., LECLERC, D. Changes in the performance of filter media during clogging and cleaning cycles. **Ann. Occup. Hyg**, v.45, n.2, p.115-121, 2001.

CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. **Powder Technology**, v.128, p.21-217, 2002 a.

CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D. Descriptions of the clogging and cleaning cycles of filter media. **Powder Technology**, v.123, p.40-52, 2002 b.

CHENG, Y.H E TSAI, C. – **Journal of Aerosol Science and Technology**, v.29, n.4, p.315-328, 1998.

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

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

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

COURY, J. R. **Filtração de gases em filtros granulares.** In: FREIRE, J. T; GUBULIN, J.C. Tópicos especiais de sistemas particulados. José Teixeira Freire e José Carlos Gubulin, Volume 2, 1986.

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

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

DENNIS, R.; KLEMM, H.A. Recent concepts describing fabric filter system behaviour, **Filtration and Separation**, Jan/Feb, 1982.

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

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

DUO, W.; KIRKBY, N.F.; SEVILLE, J.P.K.; CLIFT, R. Patchy cleaning of rigid gas filters: Experimental and model validation. **Chemical Engineering Science**, v.52, n.1, p. 153-164, 1997.

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

FELICETTI, M.A.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. Investigação da influência dos tamanhos das partículas de polvilho doce e de concentrado fosfático sobre a força de adesão em diferentes

substratos aplicando a técnica de centrífuga. Anais **XXXII ENEMP**, Maringá-PR, 2006.1 CD ROOM.

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

HARDMAN, E. Filter media selection, science or black art? **The Journal of the Filtration Society**, v.01, 2001.

HINDS, W.C. **Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles**. Wiley Interscience, New York, 1999.

INNOCENTINI, M.D.M.; PARDO, A.R.F.; SALVINI, V.R.; PANDOLFELLI, V.C. How accurate is Darcy's Law for refractories. **The American Ceramic Society Bullrin**, november, 1999.

ITO, L. X. **Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases**. Dissertação Mestrado.Universidade Federal de São Carlos, 2002.

JAPUNTICH, D.A.; STENHOUSE, J.I.T., LIU, B.Y.H. Experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters. **Journal of Aerosol Science**, v.25, n.02, pp.385-393, 1994.

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

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

KANAOKA, C., HIRAGI, S. Pressure drop of air filter with dust load. **Journal of Aerosol Science**, v. 21, n.1, p.127-137, 1990.

KIM, H.T.; KWON, S.B.; PARK, Y.O.; LEE, K.W. Diffusional filtration of polydispersed aerosol particles by fibrous and packed-bed filters. **Filtration and Separation**, p.37-42, 2000.

KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. **Powder Technology**, p.22, 1996.

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

LISOWSKI, A., JANKOSWSKA, E., THORPE, A., BROWN, R.C. Performance of textile fibre filter material measured with monodisperse and standard aerosols. **Powder Technology**, v.118, p.149-159, 2001.

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

LUCAS, R.D. **Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2001.

MARTINS, J.C. **Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2001.

MAUSCHITZ, G.; KOSCHUTNIG, W.; HOFLINGER, W. The effect of thermal finishing on surface structure and cleaning behaviour of textile dust filter media. **Anais FILTECH**, V.II, p.II-26 a II-33, 2003.

MAUSCHITZ, G.; KOSCHUTNIG, W.; HOFLINGER, W. The influence of filter regeneration on the internal rearrangement of nonwoves for cleanable dust filters. 16 th INTERNACIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING, 2004.

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

MAUSCHITZ, G.; RUD, H.; HOFLINGER, W. Particle deposition in the depth of nonwoven dust filter media and its effect on filter clogging. **Anais FILTECH**, V.II, p.II-34 a II-41, 2007.

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

MORRIS, K.; ALLEN, R.K.K. The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters. **Filtration and Separation**. p339m April, 1996.

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 XXVIII ENEMP**, Teresópolis, RJ, 2001, p. 191-197.

NETO, B.B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora Unicamp, 2º edição. Campinas, 2002.

NÓBREGA, S.W.; COURY, J.R. Remoção de torta de filtração por pulso mecânico. In; XX Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos, 1992, **Anais do XX ENEMP**, São Carlos, SP, v.2, p.335-346.

OSÓRIO, V.M. **Comportamento da filtração de gases em Meios Filtrantes de Celulose**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2006.

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

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

REMBOR, H.J.; KASPER, G. Fibrous filter – measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency. III WORLD CONGRESS ON PARTICLE TECHNOLOGY, 1996.

RENNER TÊXTIL LTDA. **Material técnico sobre filtros de mangas**. Home page: <<http://www.rennertextil.com.br>>, 2001.

RODRIGUES, A.C. **Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2004.

RODRIGUES, K.B. **Filtração de gases: Estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 2006.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 1º edição, Campinas-SP, 2005.

ROSS, R.D. **Air pollution and industry**. Van Nostrand Reinhold Company, New York, p.489, 1972.

ROTHWELL, E. Fabric dust filtration: principles and practice. **Filtration and Separation**. P-471-475, 1980.

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

RUD, H.; MAUSCHITZ, G.; HOFLINGER, W. Transmitted-light microscopy- A new method for surface structure analysis of cleanable non-woven dust filter media. **Journal of Hazardous Materials**. P.742-746, 2007.

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

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

SILVA NETO, O.G. S. **Desempenho de um filtro de manga operando na remoção de partículas de ar**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 1996.

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

STOCKLMAYER, C.H.; HOFLINGER, W. Simulation of the regeneration of dust filters. **Mathematics and Computer in Simulations**. V.46, p. 601-609, 1998.

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

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

THOMAS, D.; PENICOT, P.; CONTAL, P.; LECLERC, D.; VENDEL, J. Clogging of fibrous filter by solid aerosol particles. Experimental and modeling study. **Chemical Engineering Science**, v.56, p.3549-3561, 2001.

TIENI, E.F. **Filtração de gases: Estudo do fenômeno da limpeza por blocos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2005.

TOGNETTI, E.R. **Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2007.

VDI 3926 Part 1. Testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation or cleanable filter media. Dusseldorf, Germany, (2003).

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

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

WALSH, D.C., STENHOUSE, J.I.T. The effect of particle charge and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. **Journal of Aerosol Science**, v.28, n.2, p.783-799, 1997

WIMMER, A. PTFE yarns and fibres in hot gas filtration. **Filtration and Separation**, p.26-28, 1999.

ANEXO A

## ANEXO A

### PREPARAÇÃO DO TECIDO PARA ANÁLISE EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO E ÓTICO

Após o término dos ensaios de filtração, as amostras passaram através de cinco processos de tratamento, para possibilitar a obtenção das imagens através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e o Microscópio Ótico. Este procedimento desenvolvido por AGUIAR (1995), consistem nos seguintes passos:

#### A.1 PRÉ-ENDURECIMENTO DA AMOSTRA

Para realização deste procedimento utilizou-se um equipamento mostrado na Figura A.1 que consistia em duas tampas de ferro galvanizado semelhante a caixa de filtração. A parte interna dessas tampas foi revestida com uma borracha macia, a fim de permitir a vedação.

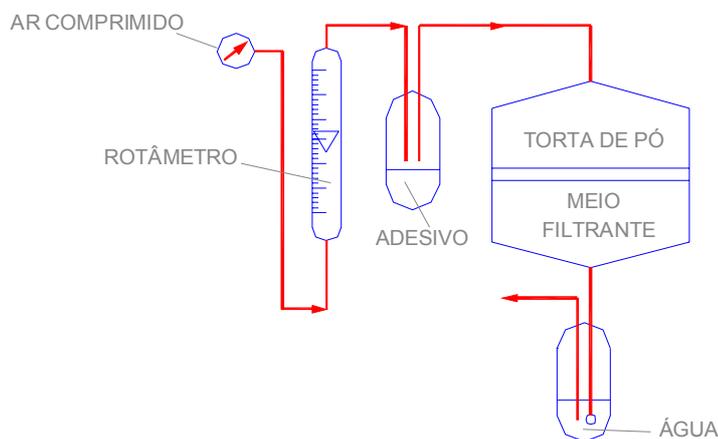


Figura A.1: Equipamento para o pré-endurecimento da amostra.

Para medir a vazão do ar comprimido que arrastava o vapor adesivo instantâneo (LOCTITE-416) utilizou-se um rotâmetro e o valor da vazão foi mantido constante em 0,5 l/min.

O método consistia em passar vapor de adesivo instantâneo(LOCTITE-416), arrastado pelo fluxo de ar úmido, através do meio filtrante. A velocidade do gás de arraste foi mantida aproximadamente 0,1 cm/s, para evitar um possível rearranjo das partículas impregnadas no tecido durante o pré-endurecimento. O tecido ficou neste equipamento por aproximadamente 24 horas até que fosse garantida a impregnação do adesivo ao meio filtrante.

## A.2 EMBUTIMENTO DO TECIDO

Após o pré-endurecimento, o tecido foi transportado para um vasilha de pirex redonda contendo uma esponja de 0,5 mm de espessura de mesma área do tecido. A parte interna ficou completamente encharcada com uma resina embutidora (PMS-10). Depois de se colocar o recipiente, adicionou-se mais resina até que todo o tecido estivesse completamente encharcado. Em seguida colocou-se o tecido numa estufa a 60°C, por aproximadamente 24 horas, para “curar” a resina. Este procedimento está mostrado na Figura A.2.

A resina utilizada PM-10 possui baixa viscosidade, 7 a 10 cp, é anaeróbica, de cor clara, tempo de vida de 1 ano e não contém solvente. Esta resina foi fornecida pela LOCTITE do Brasil.

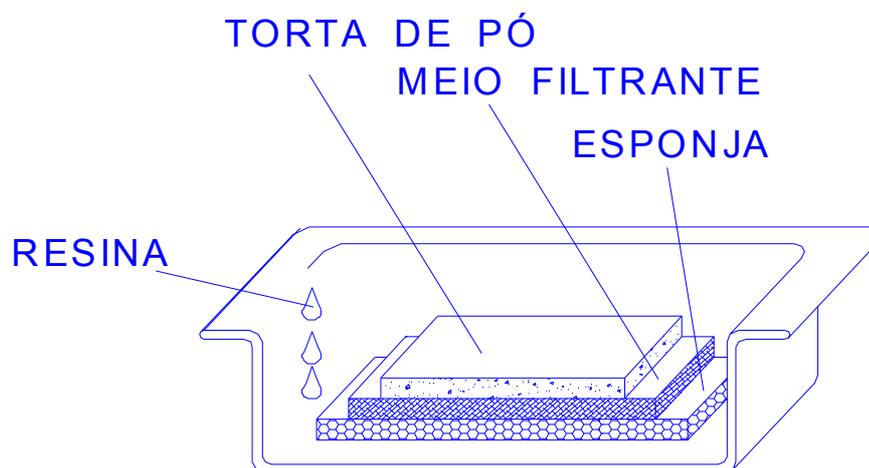


Figura A.2: Vista do equipamento de embutimento.

### **A.3 SECCIONAMENTO**

O tecido já endurecido foi seccionado em pedaços quadrados de 1 cm<sup>2</sup> de área, aproximadamente, utilizando um serra de correia. A seguir estes pedaços foram embutidos em moldes cilíndricos de PVC, utilizando outra resina, RESAPOL-208, deixando-a “curar” por 24 horas à temperatura ambiente. A impregnação com esta resina proporcionou resistência mecânica à amostra, visando atenuar a desestruturação nas etapas de esmerilamento e polimento.

### **A.4 ESMERILAMENTO**

Esta etapa visou retirar arranhões causados pelo seccionamento do tecido e desgastar a amostra. As amostras foram lixadas, a úmido, cuidadosamente em lixas de carbetto de silício na seqüência de 320,600,1200 e 2000 mesh, mantendo-se a operação em torno de 10 minutos em cada lixa, dependendo da amostra. Entre cada lixa a amostra foi lavada com água e álcool.

### **A.5 POLIMENTO**

Depois de esmeriladas as amostras foram polidas, utilizando-se uma politriz em baixa rotação. O tecido utilizado na politriz é um veludo macio, que foi impregado com uma suspensão de alumina de 1 µm. O tempo de duração desta operação variou de acordo com a amostra, mas girou em torno de 30 minutos.

O polimento foi feito até que se retirasse todos os riscos deixados na amostra pela lixas da etapa anterior, que podiam ser vistos em microscópio óptico.

Quando as amostras estavam livres de qualquer ranhura, elas foram submetidas a um recobrimento metálico de ouro puro, utilizando um equipamento específico denominado “Sputtering”, do Laboratório de Preparação de Amostras do CCDM (UFSCar).

**ANEXO B**

## ANEXO B

Depois de realizadas as etapas de tratamento, as amostras foram levadas ao microscópio para a geração das imagens. Para cada ciclo realizado foram escolhidos 10 perfis transversais do filtro para avaliar o comportamento do diâmetro, do número de partículas e da profundidade de deposição, determinada através de um analisador de imagem, Image-Pro Plus 3.0.

## B1 TECIDO DE ACRÍLICO E PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA

**Tabela B1: Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo1:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,463	1,456	1,710	1,076	1,421
107-214	1,025	1,028	1,931	0,945	1,041
214-321	0,756	1,145	0,794	1,065	1,027
321-428	1,332	1,237	0,731	0,868	0,704
428-535	0,955	1,022	0,765	0,811	0,942
535-642		0,653			
642-749		0,636			
749-856		0,521			
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	535 $\mu\text{m}$	856 $\mu\text{m}$	488 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	512 $\mu\text{m}$
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,333	1,394	1,382	0,766	1,303
107-214	1,447	1,072	0,953	0,822	1,307
214-321	0,998	1,010	0,853	0,983	1,179
321-428	1,261	0,913	-	0,950	1,142
428-535	1,001	0,763	0,658	0,873	0,826
535-642	0,995	0,851	0,754		0,613
642-749	0,656				
749-856	1,201				
856-963	0,700				
963-1070	0,684				
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	963 $\mu\text{m}$	607 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	513 $\mu\text{m}$	613 $\mu\text{m}$

**Tabela B2: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 1.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,108	0,737	1,321	1,161	1,185
107-214	0,817	0,921	1,546	1,022	0,342
214-321	0,486	0,824	0,457	0,932	0,755
321-428	1,198	0,551	0,557	0,574	0,302
428-535	0,658	0,505	0,424	0,348	0,383
535-642		0,402			
642-749		0,425			
749-856		0,340			
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,328	1,361	1,304	0,489	1,215
107-214	1,516	0,793	0,514	0,506	1,012
214-321	0,542	0,709	0,510	0,689	1,157
321-428	1,186	0,606	-	0,361	0,933
428-535	0,862	0,528	0,350	0,736	0,577
535-642	0,739	0,601	0,212		0,161
642-749	0,383				
749-856	0,840				
856-963	0,386				
963-1070	0,418				

**Tabela B3: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 1.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	651	567	637	538	595
107-214	95	12	109	654	5
214-321	9	48	5	92	59
321-428	37	11	36	22	14
428-535	21	5	10	3	3
535-642		44			
642-749		11			
749-856		4			
856-963					
963-1070					
Total de partículas	813	702	797	1309	676

Continuação da Tabela B3

<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	559	409	483	143	297
107-214	387	377	20	39	299
214-321	18	165	3	178	313
321-428	63	59	-	4	125
428-535	14	13	8	11	32
535-642	40	16	4		4
642-749	18				
749-856	19				
856-963	20				
963-1070	8				
Total de partículas	1146	1039	518	375	1070

**Tabela B4: Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 2:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Diâmetros de partículas</b>				
	<b>Coluna 1</b>	<b>Coluna 2</b>	<b>Coluna 3</b>	<b>Coluna 4</b>	<b>Coluna 5</b>
0-107	1,527	1,086	1,459	1,105	1,036
107-214	1,891	1,148	1,414	0,958	1,164
214-321	1,774	1,183	0,999	1,099	1,000
321-428	1,099	1,176	1,431	1,239	1,081
428-535	1,068	0,938	1,179	1,737	1,049
535-642	1,571	1,020	1,106	1,869	1,213
642-749	1,329	1,212	1,102	0,889	
749-856	1,319			1,357	
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	856 µm	749 µm	737 µm	856 µm	630 µm
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,443	1,300	1,016	1,326	1,324
107-214	1,278	1,150	0,910	1,229	1,181
214-321	1,225	1,121	0,994	1,059	1,004
321-428		1,086	1,336	0,900	0,996
428-535		0,854	0,841	0,823	0,936
535-642		0,902	1,063		0,829
642-749			0,876		1,007
749-856			0,796		
856-963			0,920		

Continuação da Tabela B4

963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	321 $\mu\text{m}$	633 $\mu\text{m}$	963 $\mu\text{m}$	525 $\mu\text{m}$	730 $\mu\text{m}$

**Tabela B5: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,346	1,088	1,409	0,973	0,841
107-214	1,859	0,984	1,208	0,330	0,828
214-321	1,069	0,792	0,631	0,945	0,828
321-428	0,792	0,899	1,106	0,912	0,570
428-535	0,707	0,990	1,005	2,295	0,692
535-642	1,381	0,540	1,067	1,754	0,514
642-749	0,788	1,058	0,719	0,588	
749-856	0,690			1,093	
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,675	1,150	0,873	1,327	1,105
107-214	1,298	0,537	0,850	0,743	1,116
214-321	0,729	0,667	1,231	0,830	0,612
321-428		0,424	1,578	0,556	0,444
428-535		0,363	0,542	0,457	0,479
535-642		0,490	0,957		0,496
642-749			0,573		0,604
749-856			0,563		
856-963			1,451		
963-1070					

**Tabela B6: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	450	196	571	476	103
107-214	303	50	20	43	33
214-321	18	42	39	47	33
321-428	33	10	16	99	31
428-535	31	21	25	13	32
535-642	33	7	9	28	26
642-749	24	28	16	18	

Continuação da Tabela B6

749-856	21			11	
856-963					
963-1070					
Total de partículas	913	354	696	735	258
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	357	738	46	601	494
107-214	347	23	64	31	171
214-321	35	18	15	65	12
321-428		20	23	32	11
428-535		11	28	7	12
535-642		23	18		14
642-749			19		12
749-856			11		
856-963			19		
963-1070					
Total de partículas	739	833	243	736	726

**Tabela B7: Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 3:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	0,972	0,971	1,372	1,152	0,972
107-214	1,211	1,038	1,339	1,154	0,884
214-321	1,164	0,960	1,090	1,060	0,863
321-428	1,128	1,054	0,866	1,235	0,846
428-535	0,949	0,838	1,201	0,977	0,959
535-642	0,924	0,737	1,112	1,099	
642-749				-	
749-856				0,957	
856-963				0,849	
963-1070				0,794	
Profundidade medida (µm)	571 µm	642 µm	622 µm	1070 µm	522 µm
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,010	1,084	0,977	0,938	1,239
107-214	0,946	1,0508	0,947	1,035	1,157
214-321	0,733	0,949	0,979	0,972	0,843
321-428	-	0,905	0,789	0,907	1,147

Continuação da Tabela B7

428-535	0,975	0,893	1,317	1,035	1,119
535-642	-			0,993	
642-749	1,059			0,883	
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	749 $\mu\text{m}$	505 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	688 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$

**Tabela B8: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 3.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	0,779	0,710	1,353	1,078	0,838
107-214	1,185	0,744	1,256	1,104	0,555
214-321	0,791	0,711	0,841	0,581	0,586
321-428	0,663	0,701	0,609	0,676	0,479
428-535	0,645	0,691	1,087	0,816	0,569
535-642	0,669	0,355	0,777	0,017	
642-749				-	
749-856				0,490	
856-963				0,419	
963-1070				0,369	
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	0,947	0,975	0,985	0,703	1,190
107-214	0,736	0,780	0,662	0,780	0,930
214-321	0,435	0,565	0,763	0,610	0,390
321-428	-	0,630	0,551	0,510	0,840
428-535	0,716	0,596	0,563	0,790	0,773
535-642	-			0,609	
642-749	0,395			0,541	
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B9: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 3.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	105	593	628	181	474
107-214	31	661	462	206	47

Continuação da Tabela B9

214-321	57	335	112	44	20
321-428	25	14	19	26	69
428-535	42	14	70	56	67
535-642	20	7	13	6	
642-749				-	
749-856				8	
856-963				9	
963-1070				8	
Total de partículas	280	1624	1304	544	677
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	457	493	26	196	559
107-214	251	179	238	56	24
214-321	18	190	48	42	17
321-428	-	40	38	8	124
428-535	7	24	10	15	19
535-642	-			10	
642-749	6			14	
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	739	926	360	341	743

**Tabela B10: Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 5:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,901	0,935	1,127	1,164	1,983
107-214	1,761	0,985	1,191	1,109	1,865
214-321	1,148	1,016	1,066	1,122	1,768
321-428	0,947	0,788	0,943	1,905	0,920
428-535	0,825	0,825		0,900	1,635
535-642	0,858	0,810			0,930
642-749	0,829	0,614			1,341
749-856		0,696			
856-963		0,620			
963-1070					
Profundidade medida (µm)	749 µm	963 µm	419 µm	535 µm	716 µm

Continuação da Tabela B10

<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	2,365	1,350	2,025	1,905	1,039
107-214	2,373	1,004	1,986	2,006	1,036
214-321	2,292	0,598	1,651	1,975	0,795
321-428	-	0,706		1,678	0,786
428-535	-			1,427	
535-642	1,492			0,617	
642-749	1,988			0,949	
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	642 µm	420 µm	321 µm	735 µm	386 µm

**Tabela B11: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 5.**

<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Desvio padrão</b>				
	<b>Coluna 1</b>	<b>Coluna 2</b>	<b>Coluna 3</b>	<b>Coluna 4</b>	<b>Coluna 5</b>
0-107	1,502	0,787	1,019	1,164	1,652
107-214	1,015	0,825	1,168	1,179	1,454
214-321	0,852	0,833	0,803	1,092	1,025
321-428	0,537	0,613	0,542	4,751	0,626
428-535	0,585	0,649		0,548	1,321
535-642	0,614	0,574			0,588
642-749	0,572	0,336			0,707
749-856		0,509			
856-963		0,417			
963-1070					
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	2,665	1,198	2,197	1,899	1,005
107-214	2,957	0,699	3,105	1,785	0,856
214-321	3,205	0,395	2,621	1,542	0,681
321-428	-	0,394		1,426	0,458
428-535	1,502			1,003	
535-642	1,164			0,213	
642-749				0,497	
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B12: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 5.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	408	376	823	597	519
107-214	148	701	415	240	568
214-321	50	287	401	224	103
321-428	13	38	25	24	32
428-535	28	64		31	24
535-642	18	33			26
642-749	15	18			20
749-856		8			
856-963		7			
963-1070					
Total de partículas	680	1532	1664	1116	1292
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	436	86	322	621	816
107-214	488	100	215	543	396
214-321	155	16	182	308	43
321-428	-	17		44	14
428-535	27			82	
535-642	11			9	
642-749				38	
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1117	219	719	1645	1269

**Tabela B13: Deposição de partículas de rocha fosfática no acrílico para o Ciclo 10: Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,694	1,017	1,134	0,798	1,457
107-214	1,255	1,148	1,094	0,775	1,277
214-321	1,063	1,227	1,033	1,426	1,558
321-428	1,269	0,828	0,775	1,053	0,853
428-535	1,139	1,221	0,966		1,112
535-642	0,846	1,238	0,879		1,052
642-749		0,558	0,874		
749-856		0,681			

Continuação da Tabela B13

856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	642 $\mu\text{m}$	856 $\mu\text{m}$	727 $\mu\text{m}$	428 $\mu\text{m}$	621 $\mu\text{m}$
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	0,954	1,291	0,819	1,670	1,324
107-214	0,852	1,152	0,750	1,660	1,109
214-321	0,800	1,138	0,735	1,554	1,058
321-428	0,535	1,120		1,203	1,037
428-535	-	0,921		0,893	0,968
535-642	0,733	1,015			
642-749		0,837			
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	642 $\mu\text{m}$	679 $\mu\text{m}$	295 $\mu\text{m}$	477 $\mu\text{m}$	518 $\mu\text{m}$

Tabela B14: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 10.

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,520	0,792	0,970	0,663	1,321
107-214	1,155	1,183	1,017	0,474	1,129
214-321	1,018	0,845	0,771	2,446	1,365
321-428	0,935	0,544	0,540	0,775	0,425
428-535	0,881	0,741	0,641		0,749
535-642	0,579	1,111	0,690		0,814
642-749		0,289	0,540		
749-856		0,076			
856-963					
963-1070					
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	0,850	1,076	0,563	1,594	1,2707
107-214	0,744	0,873		1,237	0,896
214-321	0,463	0,791		1,452	1,064
321-428	0,222	0,831		1,096	0,669
428-535	-	0,690		0,408	0,334
535-642	0,330	0,445			
642-749		0,549			

Continuação da Tabela B14

749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B15: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o acrílico e rocha no Ciclo 10.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	558	305	668	12	868
107-214	320	297	330	38	293
214-321	95	21	95	30	107
321-428	22	25	78	24	33
428-535	36	14	62		28
535-642	20	21	37		10
642-749		13	24		
749-856		2			
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1051	698	1294	104	1339
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	502	719	59	842	806
107-214	100	75	30	449	599
214-321	96	194	9	109	402
321-428	7	111		12	26
428-535	-	13		17	10
535-642	4	18			
642-749		16			
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	709	1146	98	1429	1843

**B2 TECIDO DE POLIPROPILENO E PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA****Tabela B16: Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo1:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,076	1,133	0,946	1,305	1,182
107-214	0,881	0,782	0,820	0,813	1,020
214-321	0,863	0,656	0,784	0,948	0,951
321-428		0,467			0,942
428-535		0,811			
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	250 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	314 $\mu\text{m}$	321 $\mu\text{m}$	421 $\mu\text{m}$
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,260	1,176	1,402	1,140	1,268
107-214	1,397	1,015	1,219	0,869	0,700
214-321	1,087	0,981	0,827	0,799	1,133
321-428	1,100		0,999	0,657	0,838
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	428 $\mu\text{m}$	313 $\mu\text{m}$	428 $\mu\text{m}$	351 $\mu\text{m}$	417 $\mu\text{m}$

**Tabela B17: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada  
camada de profundidade analisada para o Ciclo 1.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	0,966	1,114	0,672	0,693	1,019
107-214	0,661	0,784	0,582	0,408	0,812
214-321	0,402	0,474	0,357	0,822	0,477
321-428		0,218			0,498
428-535		0,366			
535-642					

Continuação da Tabela B17

642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	0,964	0996	0,715	1,140	1,209
107-214	1,010	0,777	0,651	0,482	0,578
214-321	0,863	0,439	0,525	0,284	0,564
321-428	0,996		0,506	0,313	0,462
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B18: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 1.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	528	262	196	16	741
107-214	187	21	51	32	43
214-321	22	54	25	14	68
321-428		14			57
428-535		6			
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	737	357	272	62	909
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	458	649	321	428	506
107-214	174	282	263	25	35
214-321	36	24	61	5	25
321-428	14		16	7	40
428-535					
535-642					
642-749					

Continuação da Tabela B18

749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	682	955	661	465	606

**Tabela B19: Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo2:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,598	1,360	1,390	1,406	1,610
107-214	1,097	1,654	0,904	1,744	1,417
214-321	0,822		0,873	1,412	0,856
321-428			0,873		0,849
428-535			0,848		
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	301 µm	214 µm	466 µm	321 µm	396 µm
Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,460	1,462	0,939	1,312	1,163
107-214	1,011	0,718	0,992	0,925	1,096
214-321	1,200	0,767	1,062	0,870	1,416
321-428		0,878	0,906	0,762	
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	321 µm	404µm	428 µm	371 µm	304 µm

**Tabela B20: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,565	1,669	1,257	2,009	1,576
107-214	0,903	2,497	0,413	2,758	1,325
214-321	0,505		0,513	2,055	0,470
321-428			0,652		0,437
428-535			0,401		
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,682	1,358	0,715	1,217	1,123
107-214	0,730	0,337	0,651	0,639	0,970
214-321	0,851	0,374	0,525	0,450	0,656
321-428		0,374	0,506	0,293	
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B21: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	475	305	411	340	688
107-214	480	48	42	406	305
214-321	71		41	319	37
321-428			32		31
428-535			32		
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1026	353	558	1065	1061

Continuação da Tabela B21

Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	863	663	118	601	660
107-214	225	23	30	105	59
214-321	19	38	11	24	17
321-428		30	6	11	
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1107	754	165	741	736

**Tabela B22: Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo3: Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,233	1,270	0,977	1,170	1,565
107-214	1,092	0,981	0,968	1,200	1,100
214-321	0,777	1,003	0,959	1,398	0,861
321-428	0,842	0,900	0,848		
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	428 µm	428 µm	374 µm	321 µm	294 µm
Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,523	1,465	0,998	1,263	1,274
107-214	0,941	1,024	0,896	0,957	0,997
214-321	0,933	0,977	1,105	0,901	0,976
321-428			0,975		0,970
428-535					0,880
535-642					
642-749					
749-856					

Continuação da Tabela B22

856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	321 $\mu\text{m}$	298 $\mu\text{m}$	428 $\mu\text{m}$	268 $\mu\text{m}$	492 $\mu\text{m}$

**Tabela B23: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 3.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,132	0,599	0,787	1,421	1,468
107-214	0,816	0,699	0,685	0,699	1,079
214-321	0,582	0,751	0,963	0,599	0,651
321-428	0,489	0,880	0,545		
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	0,974	1,438	1,269	1,189	1,235
107-214	1,256	0,643	1,100	0,566	0,704
214-321	0,578	0,520	0,821	0,445	0,521
321-428			0,563		0,480
428-535					0,660
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B24: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 3.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	918	258	748	129	631
107-214	439	112	338	136	119
214-321	75	59	52	45	47
321-428	60	21	35		
428-535					
535-642					
642-749					

Continuação da Tabela B24

749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1492	450	1173	310	797
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	465	545	122	855	942
107-214	143	48	39	79	223
214-321	31	18	25	44	68
321-428			14		75
428-535					103
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	639	611	200	978	1411

Tabela B25: Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo5: Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,062	1,302	1,425	1,306	1,320
107-214	1,060	1,625	1,012	1,181	1,058
214-321	1,008	1,506	1,109	0,684	0,825
321-428	0,967	1,326	1,096	0,679	0,735
428-535	0,961	0,765	0,908		
535-642			0,845		
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	490 µm	430 µm	590 µm	350 µm	428 µm
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,171	1,616	2,085	1,566	1,433
107-214		0,941		0,857	0,970
214-321		0,727		0,926	0,680
321-428				0,829	0,787

Continuação da Tabela B25

428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	107 $\mu\text{m}$	317 $\mu\text{m}$	107 $\mu\text{m}$	421 $\mu\text{m}$	351 $\mu\text{m}$

Tabela B26: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 5.

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	0,956	1,448	1,407	1,571	1,249
107-214	0,796	2,180	0,776	2,394	0,834
214-321	0,759	2,714	0,695	0,485	0,480
321-428	0,641	1,689	0,814	0,600	0,424
428-535	0,547	0,419	0,583		
535-642			0,738		
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,076	1,549	2,192	1,524	1,303
107-214		0,627		0,723	0,659
214-321		0,466		0,689	0,380
321-428				0,565	0,574
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

Tabela B27: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 5.

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	353	128	506	394	845
107-214	163	65	91	82	250
214-321	73	374	92	18	20

Continuação da Tabela B27

321-428	72	34	82	36	27
428-535	57	7	52		
535-642			53		
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	718	615	876	530	1142
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	206	598	748	528	950
107-214		57		72	230
214-321		38		23	54
321-428				52	16
428-535					
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	206	693	748	675	1250

**Tabela B28: Deposição de partículas de rocha fosfática no polipropileno para o Ciclo10: Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,152	1,147	1,307	0,978	1,236
107-214	1,077	0,872	1,119		0,819
214-321	1,065	0,723	0,734		0,762
321-428	0,913	0,824	0,874		
428-535	0,763		1,052		
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	522 µm	428 µm	434 µm	107 µm	308 µm

Continuação da Tabela B28

<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,003	1,078	1,156	1,161	1,268
107-214	1,045	0,814	1,050	0,857	1,040
214-321	1,022	0,890	0,942	1,086	0,819
321-428	1,246	0,709	0,852		
428-535	1,086		0,861		
535-642	0,875				
642-749	0,815				
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	749 µm	416 µm	535 µm	323 µm	270 µm

**Tabela B29: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 10.**

<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Desvio padrão</b>				
	<b>Coluna 1</b>	<b>Coluna 2</b>	<b>Coluna 3</b>	<b>Coluna 4</b>	<b>Coluna 5</b>
0-107	1,139	1,098	1,293	0,768	1,214
107-214	0,911	0,780	1,038	0,843	0,340
214-321	1,025	0,621	0,585	0,746	0,316
321-428	0,536	0,575	0,587	1,117	
428-535	0,395		0,488	0,709	
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,091	1,065	1,122	1,154	1,195
107-214		0,532	0,791	0,580	0,995
214-321		0,537	0,998	0,361	0,601
321-428		0,382	0,598		
428-535			0,481		
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B30: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o polipropileno e rocha no Ciclo 10.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	742	382	638	42	719
107-214	513	119	109		19
214-321	183	10	29		23
321-428	62	417	34		
428-535	41		7		
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1541	928	817	42	761
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	604	641	986	525	476
107-214	380	88	467	126	98
214-321	383	41	280	31	35
321-428	18	22	18		
428-535	18		20		
535-642	5				
642-749	1				
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1409	792	1771	682	609

### B3 TECIDO DE POLIÉSTER TRATADO E PARTÍCULAS DE ROCHA FOSFÁTICA

**Tabela B31: Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 1: Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,260	1,403	1,417	1,090	1,198
107-214	0,831	1,017	0,790	1,119	0,885
214-321	0,797	-	0,958	0,921	0,758
321-428	0,999	0,965	1,164	-	0,901
428-535		1,984	0,945	0,842	0,816

Continuação da Tabela B31

535-642		0,592		-	
642-749				0,730	
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	412 $\mu\text{m}$	642 $\mu\text{m}$	510 $\mu\text{m}$	749 $\mu\text{m}$	517 $\mu\text{m}$
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,213	1,405	0,947	1,547	1,417
107-214	0,844	1,098	0,963	0,796	0,799
214-321	0,932	0,854	1,152	0,616	1,064
321-428	-	0,911	1,362	0,776	0,895
428-535	0,522	0,826	1,211	0,843	1,130
535-642		0,813			0,856
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	535 $\mu\text{m}$	642 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	575 $\mu\text{m}$

Tabela B32: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 1.

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,125	1,707	1,389	1,090	0,983
107-214	0,598	0,710	0,514	0,540	0,633
214-321	0,451	-	0,651	0,782	0,455
321-428	0,616	0,347	0,931	-	0,586
428-535		0,338	0,472	0,344	0,504
535-642		0,230		-	
642-749				0,510	
749-856					
856-963					
963-1070					
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,052	1,398	1,250	1,423	1,256
107-214	0,823	0,898	0,793	0,604	0,722
214-321	0,452	0,553	0,896	0,256	0,948
321-428	-	0,677	0,541	0,503	0,636

Continuação da Tabela B32

428-535	0,715	0,452	0,689	0,426	0,760
535-642		0,554			0,576
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B33: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 1.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	632	547	424	127	339
107-214	168	32	82	12	263
214-321	67	-	131	27	89
321-428	14	5	44	-	54
428-535		2	25	10	24
535-642		11		-	
642-749				9	
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	881	597	706	185	769
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	326	357	452	263	362
107-214	124	48	76	116	92
214-321	56	119	84	44	130
321-428	-	45	41	60	90
428-535	5	17	12	21	38
535-642		37			24
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	511	623	665	504	736

**Tabela B34: Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 2:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,136	1,289	1,007	1,097	1,140
107-214	0,920	-	1,039	0,905	0,952
214-321	0,980	0,957	1,009	0,685	0,621
321-428	0,972	-	0,780	0,628	0,705
428-535	0,828	0,958	0,791		0,683
535-642	0,983				
642-749	1,097				
749-856	0,793				
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	811 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	483 $\mu\text{m}$	428 $\mu\text{m}$	519 $\mu\text{m}$
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,451	1,153	1,230	1,013	1,148
107-214	1,330	1,087	1,163	1,012	0,935
214-321		0,985	1,036	0,972	0,670
321-428		0,730	0,725	0,733	0,957
428-535		0,978		0,813	0,718
535-642		0,877			0,943
642-749		0,972			
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	214 $\mu\text{m}$	693 $\mu\text{m}$	428 $\mu\text{m}$	463 $\mu\text{m}$	598 $\mu\text{m}$

**Tabela B35: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada  
camada de profundidade analisada para o Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,005	1,124	0,856	1,032	1,040
107-214	0,690	-	0,883	0,598	0,598
214-321	0,723	0,968	0,803	0,462	0,468
321-428	0,804	-	0,673	0,366	0,446
428-535	0,573	0,245	0,675		0,266
535-642	0,738				
642-749	0,979				
749-856	0,606				

Continuação da Tabela B35

856-963					
963-1070					
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,845	1,042	1,166	0,963	1,048
107-214	1,776	0,995	1,149	0,819	0,616
214-321		0,786	0,726	0,517	0,386
321-428		0,589	0,358	0,503	0,563
428-535		0,552		0,459	0,578
535-642		0,709			0,548
642-749		0,645			
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B36: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 2.**

<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Número de Partículas</b>				
	<b>Coluna 1</b>	<b>Coluna 2</b>	<b>Coluna 3</b>	<b>Coluna 4</b>	<b>Coluna 5</b>
0-107	1015	226	508	568	502
107-214	940	-	607	287	13
214-321	185	57	237	62	72
321-428	126	-	153	35	58
428-535	432	3	22		12
535-642	168				
642-749	43				
749-856	10				
856-963					
963-1070					
Total de partículas	2919	286	1527	952	657
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	382	572	348	512	335
107-214	310	33	515	184	686
214-321		75	78	40	59
321-428		150	25	111	53
428-535		24		17	54
535-642		23			14
642-749		12			
749-856					
856-963					

Continuação da Tabela B36

963-1070					
Total de partículas	692	889	966	864	1201

**Tabela B37: Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 3: Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	0,970	1,353	1,051	1,195	1,002
107-214	0,741	1,215	0,937	1,029	0,904
214-321	0,823	1,152	0,723	0,977	0,750
321-428	0,792	0,748	0,837	0,934	0,836
428-535		0,959	0,832	1,053	0,817
535-642					0,811
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	428 µm	535 µm	480 µm	535 µm	642 µm
Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,598	0,924	1,358	1,032	1,087
107-214	0,963	0,916	1,103	0,836	0,837
214-321	0,785	0,838	0,932	0,673	0,690
321-428	0,865	0,735	0,992	1,066	1,008
428-535	0,983	0,883	1,027	0,933	0,708
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	535 µm	535 µm	535 µm	473 µm	535 µm

**Tabela B38: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 3.**

Profundidade (µm)	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	0,792	1,287	1,036	1,254	0,883
107-214	0,489	0,990	0,780	1,003	0,701
214-321	0,543	0,978	0,426	0,714	0,522
321-428	0,482	0,447	0,545	0,644	0,536

Continuação da Tabela B38

428-535		0,553	0,563	0,580	0,349
535-642					0,537
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	0,963	0,806	1,222	0,965	1,063
107-214	1,028	0,631	1,058	0,700	0,497
214-321	1,059	0,711	0,790	0,469	0,502
321-428	1,259	0,427	0,695	0,658	0,698
428-535	0,759	0,547	0,751	0,477	0,378
535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

Tabela B39: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 3.

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	907	561	530	513	946
107-214	374	94	630	420	425
214-321	510	42	253	280	197
321-428	54	12	63	26	486
428-535		33	39	7	47
535-642					32
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1845	742	1515	1246	2133
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	358	521	269	529	382
107-214	287	613	112	242	159
214-321	105	205	85	292	228
321-428	54	104	23	57	15
428-535	21	70	21	47	29

Continuação da Tabela B39

535-642					
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	825	1513	510	1167	813

**Tabela B40: Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 5:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

Profundidade (µm)	Diâmetros de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,188	1,206	1,1103	1,499	1,139
107-214	0,791	1,121	0,964	1,273	0,924
214-321	0,898	1,085	0,898	1,254	0,847
321-428	0,887	0,567	0,847	0,587	0,814
428-535	0,768		0,843		0,786
535-642					0,737
642-749					0,816
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	520 µm	428 µm	506 µm	428 µm	691 µm
Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,066	1,267	1,335	1,337	1,472
107-214	0,848	1,329	1,178	1,121	1,124
214-321	0,693	1,340	1,268	0,708	1,157
321-428		1,038	0,733	0,953	0,907
428-535		0,836	0,635	0,863	
535-642			0,990	0,829	
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida (µm)	321 µm	535 µm	642 µm	602 µm	428 µm

**Tabela B41: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 5.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,126	0,947	1,066	1,646	1,065
107-214	0,487	0,984	0,769	1,239	0,651
214-321	0,527	0,856	0,485	1,425	0,601
321-428	0,588	0,182	0,525	0,211	0,449
428-535	0,433		0,430		0,303
535-642					0,353
642-749					0,616
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	0,588	1,136	1,522	1,319	1,428
107-214	0,407	1,247	1,100	0,757	1,110
214-321	0,381	1,167	1,414	0,358	0,664
321-428		0,416	0,324	0,492	0,504
428-535		0,633	0,259	0,678	
535-642			0,517	0,453	
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B42: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 5.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1083	71	845	603	669
107-214	158	157	104	473	208
214-321	60	40	5	335	68
321-428	47	9	26	13	40
428-535	37		30		31
535-642					42
642-749					27
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	1385	277	1010	1424	1085

Continuação da Tabela B42

<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	18	286	740	406	387
107-214	25	156	406	175	178
214-321	15	110	163	16	20
321-428		11	36	19	5
428-535		25	7	5	
535-642			4	25	
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	58	588	1356	646	590

**Tabela B43: Deposição de partículas de rocha fosfática no poliéster tratado para o Ciclo 10:  
Diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.**

<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Diâmetros de partículas</b>				
	<b>Coluna 1</b>	<b>Coluna 2</b>	<b>Coluna 3</b>	<b>Coluna 4</b>	<b>Coluna 5</b>
0-107	1,298	1,084	1,007	1,326	1,207
107-214	1,120	0,883	0,889	1,110	0,917
214-321	0,892	0,906	0,868	0,910	0,763
321-428	0,890	0,950	0,918	0,817	0,811
428-535	0,976	1,022	0,838	0,947	0,905
535-642		0,770			
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	535 $\mu\text{m}$	642 $\mu\text{m}$	502 $\mu\text{m}$	535 $\mu\text{m}$	497 $\mu\text{m}$
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	1,209	1,159	1,536	1,321	1,575
107-214	-	0,833	1,321	0,799	1,253
214-321	-	0,712	1,050	0,887	1,131
321-428	2,080	0,790	0,962	0,755	0,967
428-535	1,029	0,862	0,858	0,822	0,919
535-642			1,062	1,296	
642-749					
749-856					
856-963					

Continuação da Tabela B43

963-1070					
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	535 $\mu\text{m}$	470 $\mu\text{m}$	642 $\mu\text{m}$	602 $\mu\text{m}$	489 $\mu\text{m}$

**Tabela B44: Desvio padrão do diâmetro de partículas para cada camada de profundidade analisada para o Ciclo 10.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Desvio padrão				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	1,283	1,462	0,878	1,806	1,191
107-214	1,108	0,726	0,686	1,505	0,614
214-321	0,794	0,544	0,561	0,596	0,703
321-428	0,664	0,919	0,511	0,509	0,563
428-535	0,629	0,525	0,524	0,667	0,716
535-642		0,316			
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-107	1,552	1,114	1,962	1,296	1,518
107-214	-	0,695	1,499	0,472	1,189
214-321	-	0,439	1,118	0,755	0,888
321-428	2,357	0,589	0,800	0,500	0,639
428-535	0,561	0,505	1,048	0,424	0,716
535-642			0,670	0,735	
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					

**Tabela B45: Número de partículas retidas no meio filtrante após a limpeza, para o poliéster tratado e rocha no Ciclo 10.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de Partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-107	593	552	485	643	369
107-214	683	592	466	633	35
214-321	392	13	76	446	26
321-428	126	7	58	73	30
428-535	122	2	5	11	23
535-642		5			
642-749					
749-856					

Continuação da Tabela B45

856-963					
963-1070					
Total de partículas	1916	1171	1090	1806	483
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-107	2	566	746	345	237
107-214	-	102	722	56	362
214-321	-	50	644	35	112
321-428	2	70	74	81	24
428-535	1	22	202	34	18
535-642			11	5	
642-749					
749-856					
856-963					
963-1070					
Total de partículas	4	810	2399	556	753

**B4 TECIDO DE POLIÉSTER TRATADO E PARTÍCULAS DE POLVILHO DOCE****Tabela B46: Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 1.**

Profundidade (µm)	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	357	620	240	669	334
312-624	30	212	21	46	34
624-936	-	14	7	11	21
936-1248	12	24	4		3
1248-1560	15	10			
1560-1872	2	5			
1872-2184	3				
2184-2496					
2496-2808					
Total de partículas	419	885	272	726	392
Profundidade medida (µm)	2071	1872	1152	936	1179
<b>Profundidade (µm)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-312	417	380	225	452	162

Continuação da Tabela B46

312-624	18	48	36	8	26
624-936	5	5	18	7	7
936-1248	3	7	12	8	15
1248-1560			4	6	5
1560-1872			2		
1872-2184					
2184-2496					
2496-2808					
Total de partículas	443	440	297	481	215
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	1248	1233	1872	1506	1420

**Tabela B47: Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	202	169	443	476	213
312-624	3	46	16	337	7
624-936	3	5	-	476	1
936-1248	2	-	2	177	1
1248-1560	2	1	1	272	2
1560-1872	2	1	2	115	
1872-2184	1		-	17	
2184-2496			1		
2496-2808					
Total de partículas	215	222	465	1870	224
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2120	1552	2206	2184	1511
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	641	335	538	214	394
312-624	225	17	372	38	222
624-936	259	2	568	5	4
936-1248	231	-	462	5	2
1248-1560	74	4	488	15	-
1560-1872	43		458	2	1
1872-2184	17		352		7
2184-2496	8		133		
2496-2808			146		
Total de partículas	1498	358	3517	279	630
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2496	1400	2695	1688	1982

**Tabela B48: Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 3.**

Profundidade (µm)	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	314	368	274	198	296
312-624	86	56	432	266	81
624-936	6	12	53	54	5
936-1248			15	16	3
1248-1560			1		2
1560-1872					
1872-2184					
2184-2496					
2496-2808					
Total de partículas	406	436	775	534	387
Profundidade medida (µm)	816	936	1278	1248	1408
Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	462	349	330	229	220
312-624	430	142	64	48	120
624-936	112	25	21	2	12
936-1248	144	2		4	
1248-1560	15	3			
1560-1872	10	3			
1872-2184		-			
2184-2496		-			
2496-2808		5			
Total de partículas	1173	529	415	283	352
Profundidade medida (µm)	1872	2555	936	1187	923

**Tabela B49: Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 5.**

Profundidade (µm)	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	289	345	385	421	423
312-624	145	115	250	85	169
624-936	85	63	45	69	15
936-1248	15	12	18	20	5
1248-1560	5		6		3
1560-1872			2		
1872-2184			1		

Continuação da Tabela B49

2184-2496					
2496-2808					
Total de partículas	539	535	707	595	615
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	1350	1248	1880	1248	1420
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-312	121	294	371	288	334
312-624	32	75	96	77	110
624-936	14	29	58	15	34
936-1248		15	24	4	4
1248-1560		3	29		1
1560-1872			13		1
1872-2184					
2184-2496					
2496-2808					
Total de partículas	167	416	591	384	484
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	936	1345	1872	1170	1642

Tabela B50: Deposição de partículas para o tecido de poliéster tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 10.

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	299	285	273	69	236
312-624	48	100	71	6	203
624-936	5	30	27	1	98
936-1248	3	9	24		34
1248-1560	2	2	1		3
1560-1872		1	2		-
1872-2184		2			2
2184-2496		1			2
2496-2808					
Total de partículas	357	430	400	76	578
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	1353	2496	1854	936	2472
<b>Profundidade (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Coluna 6</b>	<b>Coluna 7</b>	<b>Coluna 8</b>	<b>Coluna 9</b>	<b>Coluna 10</b>
0-312	155	165	232	285	262

Continuação da Tabela B50

312-624	37	199	77	81	160
624-936	154	202	20	280	9
936-1248	212	116	20	67	13
1248-1560	215	7	4	7	4
1560-1872	39	-		2	1
1872-2184		3			
2184-2496					
2496-2808					
Total de partículas	812	692	353	722	449
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	1872	2163	1560	1790	1646

## B5 TECIDO DE POLIÉSTER NÃO TRATADO E PARTÍCULAS DE POLVILHO DOCE

**Tabela B51: Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 1.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	366	321	456	365	356
312-624	366	498	366	298	182
624-936	81	323	92	610	157
936-1248	128	283	407	533	134
1248-1560	143	185	405	386	138
1560-1872	29	205	436	391	233
1872-2184	15	20	330	18	205
2184-2496	1		281		166
2496-2808	1		57		61
2808-3120			176		46
3120-3432			15		18
3432-3744			13		
Total de partículas	1130	1835	3034	2601	1696
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2648	2184	3707	2184	3268
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	199	372	174	489	344
312-624	103	224	82	481	47
624-936	34	143	-	342	154
936-1248	30	192	8	302	161
1248-1560		103	6	185	90

Continuação da Tabela B51

1560-1872		153	7	118	4
1872-2184		242		169	
2184-2496		120		101	
2496-2808		25		187	
2808-3120		6		63	
3120-3432		6		43	
3432-3744					
Total de partículas	366	1586	277	2480	801
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	1248	3188	1872	3330	2028

**Tabela B52: Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 2.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	351	476	463	641	498
312-624	100	337	202	225	436
624-936	281	476	300	259	121
936-1248	246	177	170	231	90
1248-1560	254	272	136	74	238
1560-1872	211	115	23	43	83
1872-2184	116	17	27	17	10
2184-2496	53			8	3
2496-2808	219				
2808-3120					
3120-3432					
3432-3744					
Total de partículas	1831	1870	1321	1498	1479
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2781	2184	2147	2496	2196
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	423	399	538	290	387
312-624	229	457	372	220	320
624-936	265	289	568	97	236
936-1248	170	343	462	-	286
1248-1560	178	184	488	-	182
1560-1872	107	35	458	1	150
1872-2184	70	9	352		8
2184-2496	343	1	133		3
2496-2808	614	1	146		

Continuação da Tabela B52

2808-3120					
3120-3432					
3432-3744					
2808-3120					
Total de partículas	2399	1718	3517	608	1572
Profundidade medida (µm)	2808	2560	2808	1591	2373

**Tabela B53: Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 3.**

Profundidade (µm)	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	408	640	417	275	350
312-624	248	486	174	568	310
624-936	60	251	67	200	101
936-1248	41	130	1	102	62
1248-1560	25	18	4	48	19
1560-1872	8	6		13	3
1872-2184	3			4	
2184-2496	1				
2496-2808					
2808-3120					
3120-3432					
3432-3744					
Total de partículas	794	1531	663	1210	845
Profundidade medida (µm)	2496	1872	1560	2184	1838
Profundidade (µm)	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	583	372	573	340	466
312-624	276	380	298	360	422
624-936	260	202	354	86	83
936-1248	502	168	254	35	171
1248-1560	94	24	65	20	18
1560-1872	5	10		6	1
1872-2184	2	5		1	1
2184-2496		2			
2496-2808		2			
2808-3120					
3120-3432					
3432-3744					

Continuação da Tabela B53

Total de partículas	1722	1165	1544	1642	1162
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2184	2808	1560	1980	1940

**Tabela B54: Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 5.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	376	361	482	377	399
312-624	267	243	178	175	346
624-936	308	212	309	229	395
936-1248	291	330	228	492	209
1248-1560	89	238	110	553	95
1560-1872	32	45	141	349	258
1872-2184	4	23	18	136	83
2184-2496		73		40	
2496-2808		21		15	
2808-3120					
3120-3432					
3432-3744					
Total de partículas	1367	1546	1466	2366	1785
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2149	2808	1953	2808	2114
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	240	450	333	460	490
312-624	323	145	323	419	556
624-936	414	371	441	401	408
936-1248	275	47	502	456	469
1248-1560	426	9	332	377	265
1560-1872	357	3	386	144	106
1872-2184	316		331	57	5
2184-2496	389		320	5	
2496-2808	420		148		
2808-3120	453		43		
3120-3432	189				
3432-3744	246				
Total de partículas	4048	1025	3059	2319	2299
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	3744	1683	3120	2404	1980

**Tabela B55: Deposição de partículas para o tecido de poliéster não tratado: Número de partículas com a profundidade de penetração utilizando o polvilho doce para o Ciclo 10.**

Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Número de partículas				
	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4	Coluna 5
0-312	547	178	445	458	335
312-624	396	106	280	675	277
624-936	353	301	344	319	290
936-1248	213	275	140	230	215
1248-1560	217	426	86	160	432
1560-1872	94	416	31	113	283
1872-2184	54	285	10	36	26
2184-2496	38	64	23	80	18
2496-2808	76	29	1	111	-
2808-3120	25	12	-	25	-
3120-3432		2	1		7
3432-3744					
Total de partículas	1988	2094	1361	2207	1883
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2999	3432	3307	3120	3388
Profundidade ( $\mu\text{m}$ )	Coluna 6	Coluna 7	Coluna 8	Coluna 9	Coluna 10
0-312	362	398	261	472	467
312-624	259	376	231	303	345
624-936	421	323	522	363	327
936-1248	644	161	567	170	228
1248-1560	390	182	399	207	342
1560-1872	294	132	244	37	291
1872-2184	210	45	40	39	58
2184-2496	205	53	195	15	35
2496-2808	46	99	104	6	21
2808-3120		64	17		
3120-3432		12	28		
3432-3744					
Total de partículas	2831	1845	2608	1612	2058
Profundidade medida ( $\mu\text{m}$ )	2808	3333	3432	2752	2693

**ANEXO C**

## ANEXO C

### PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

A necessidade crescente da otimização de produtos e processos, minimizando custos e tempos, maximizando rendimento, produtividade e qualidade de produtos, dentre outros objetivos, tem levado profissionais de diferentes formações a buscarem técnicas sistemáticas de planejamento de experimentos.

A metodologia do planejamento fatorial, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro. No entanto, para que o uso dessa metodologia atinja os objetivos desejados, é necessário haver uma integração entre o processo, a estatística e o bom senso, tanto da equipe responsável pela montagem dos experimentos, quanto da equipe pela análise estatística e estratégica dos resultados.

#### **C.1 Porque utilizar o Planejamento Experimental**

1. É fato bem conhecido que o desenvolvimento de um novo produto e/ou processo é, em geral, dependente de um grande número de variáveis.

O planejamento consciente dos experimentos que devem ser realizados para determinar, e mesmo quantificar, a influência das variáveis de respostas desejadas, é indispensável para que resultados confiáveis sejam obtidos e para que análises estatísticas consistentes possam ser realizadas. Nesse contexto, consideramos que desenvolver produtos e processos através de procedimentos de tentativa e erro, conforme registros do início do século passado, foi de fato, importantes naquele momento. No entanto, a forte competitividade, a difusão da tecnologia, bem como a competência e a responsabilidade dos pesquisadores atuais inviabiliza tais procedimentos.

2. Naturalmente, tais idéias são aplicáveis à otimização de produtos que já estão no mercado e à sua adequação à preferência do consumidor.
3. Quantificar o efeito das variáveis do processo através das técnicas do planejamento experimental, com o objetivo de obter informações sobre a robustez ou não das respostas

desejadas, é de fundamental importância para a área de implementação de controle de processos.

Assim, por exemplo, quando um processo a temperatura é um dos fatores a ser controlado, a quantificação da faixa de temperatura na qual o processo se mantém estável, é essencial para a definição da estratégia de controle: se a resposta for robusta, ou seja, se o processo se mantém estável numa faixa razoável de temperatura, então a implantação de um controlador convencional do tipo PID (Proporcional Integral Diferencial) é suficiente, mais econômica e atinge o objetivo. Caso contrário, se qualquer alteração da temperatura desestabiliza o processo, um controlador avançado adaptativo se faz necessário.

4. O planejamento experimental vem sendo utilizado com o objetivo de aprimorar metodologias analíticas e tem possibilitado, por exemplo, melhorar a performance de análises de HPLC (High Performance Liquid Chromatography): maior resolução dos picos de cromatografia, assim como a minimização de reagentes caros que envolvem metodologias analíticas, sem prejuízo na qualidade dos resultados.
5. Otimização do rendimento de processos, de formulações que conduzam à maior aceitação global do produto, bem como do custo, da produtividade, da cor desejada, da pureza na recuperação de uma enzima, maior extração de um produto e assim por diante.

## **C.2 Vantagens do Planejamento Experimental**

Um planejamento de experimentos é uma ferramenta extremamente importante para engenheiros e cientistas que estejam interessados em melhorar o desempenho de um processo de fabricação. A aplicação das técnicas de um planejamento experimental em processo de desenvolvimento pode resultar em:

1. Menor número de experiências ou repetições e melhorando a qualidade da informação obtida através dos resultados. Isto significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final. Naturalmente, caberá ao pesquisador investir algum tempo no planejamento do processo e no estudo das variáveis envolvidas, coletando informações na literatura, para que a definição da estratégia de realização de ensaios possa agregar melhor qualidade aos resultados obtidos.

2. Os fatores são analisados simultaneamente. Assim, podemos verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse. Dentre vários processos onde ocorrem interações entre os fatores, citamos um exemplo clássico: o binômio tempo/temperatura. Se analisarmos separadamente cada um deles, não atingiremos a condição otimizada, pois não conseguiremos detectar a interação entre eles.
3. É possível otimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo. Esta é uma das grandes vantagens do planejamento fatorial. Podemos maximizar variáveis como rendimento, produtividade e pureza, e/ou minimizar as variáveis custo e contaminação, entre outras, individual ou simultaneamente.
4. Permite calcular e avaliar o erro experimental. Isto é fundamental para que possamos especificar o nível de confiança estatística com o qual poderemos estimar a reprodutibilidade do resultado desejado. Não é prudente confiar num resultado isolado. É desejável saber se repetirmos o processo  $n$  vezes  $n$  ele terá o comportamento semelhante, variando segundo um erro experimental esperado, de modo a assegurar a estabilidade do processo. Com isto, estaremos em posição mais confortável para verificar se a variação drástica de uma resposta é fruto da alteração da condição de um parâmetro ou, se é proveniente de um erro experimental provocado por alterações laboratoriais como, por exemplo, variação da temperatura, erro na pesagem da formulação, mudança de matéria primas, ou ainda, se é devida a erros grosseiros de transcrição de dados ou falácias na análise estatística dos resultados.
5. Depende mais da competência do profissional em sua área de atuação que se seus conhecimentos em estatística.

### **C.3 Instruções para Experimentos Planejados**

Para utilizar aplicações estatísticas ao planejar e analisar um experimento, é necessário que todos os que estão envolvidos em um experimento tenham uma idéia clara no avanço em que vai ser estudado, como os dados estão coletados, e por último, o entendimento qualitativo de como esses dados estão sendo analisados. Os procedimentos recomendados seguem da seguinte forma:

1. Definir claramente quais são os objetivos a serem alcançados com os experimentos:

- Realizar reuniões para analisar profundamente o processo em estudo, envolvendo todas as pessoas que possam contribuir com o trabalho.
  - Verificar as restrições do processo.
  - Definir as variáveis independentes de estudo ou fatores e as dependentes (respostas de interesse) a serem analisadas.
2. Elaborar procedimento experimental levando em consideração todas as variáveis independentes definidas no item 1. Se o número de variáveis independentes for igual a 2 ou 3, um fatorial completo deverá ser realizado. Se for maior ou igual a 4, dependerá da complexidade do experimento, tempo e custo para execução. Na maioria das vezes é mais interessante começar com um fatorial fracionado ou Plackett & Burman, analisar os efeitos principais das variáveis sobre as respostas e realizar um outro planejamento, seqüencialmente, reduzindo o número de variáveis e alterando as faixas de estudo em função do impacto que elas tiveram sobre as respostas.
  3. Realizar os experimentos e obter as respostas. Não esqueça de analisar todas as respostas de interesse. Você pode apenas ter 2 ou 3 variáveis independentes e várias respostas analisadas.
  4. Calcular os efeitos das variáveis, os respectivos erros e analisar estatisticamente.
  5. Sempre que for utilizado um fatorial fracionado ou um delineamento de Plackett & Burman com o objetivo de *screening* o nível de significância fixa a priori será de 10% ( $p < 0,01$ ).
  6. Elaborar os modelos preditivos das respostas em função das variáveis independentes quando tiver sido realizado o delineamento composto central rotacional.
  7. Realizar a ANOVA para verificar a qualidade de ajuste do modelo – Análise de Variância. Calcular as respostas através do modelo ajustado e os desvios entre a resposta experimental e a estimada pelo modelo.
  8. Gerar as superfícies de resposta e curvas de contorno para análise e definir as faixas ótimas operacionais de cada variável do processo.
  9. Validação experimental dos resultados realizando ensaios nas condições otimizadas antes de colocar o processo em escala industrial.

10. Elaboração do relatório: descrever claramente o trabalho realizado, utilizando gráficos e tabelas. Minimizar o uso da terminologia estatística desnecessária e expressar as informações do modo mais simples possível (RODRIGUES, 2005).

A Figura 2.15 representa esquematicamente as etapas necessárias para se atingir as respostas desejadas.

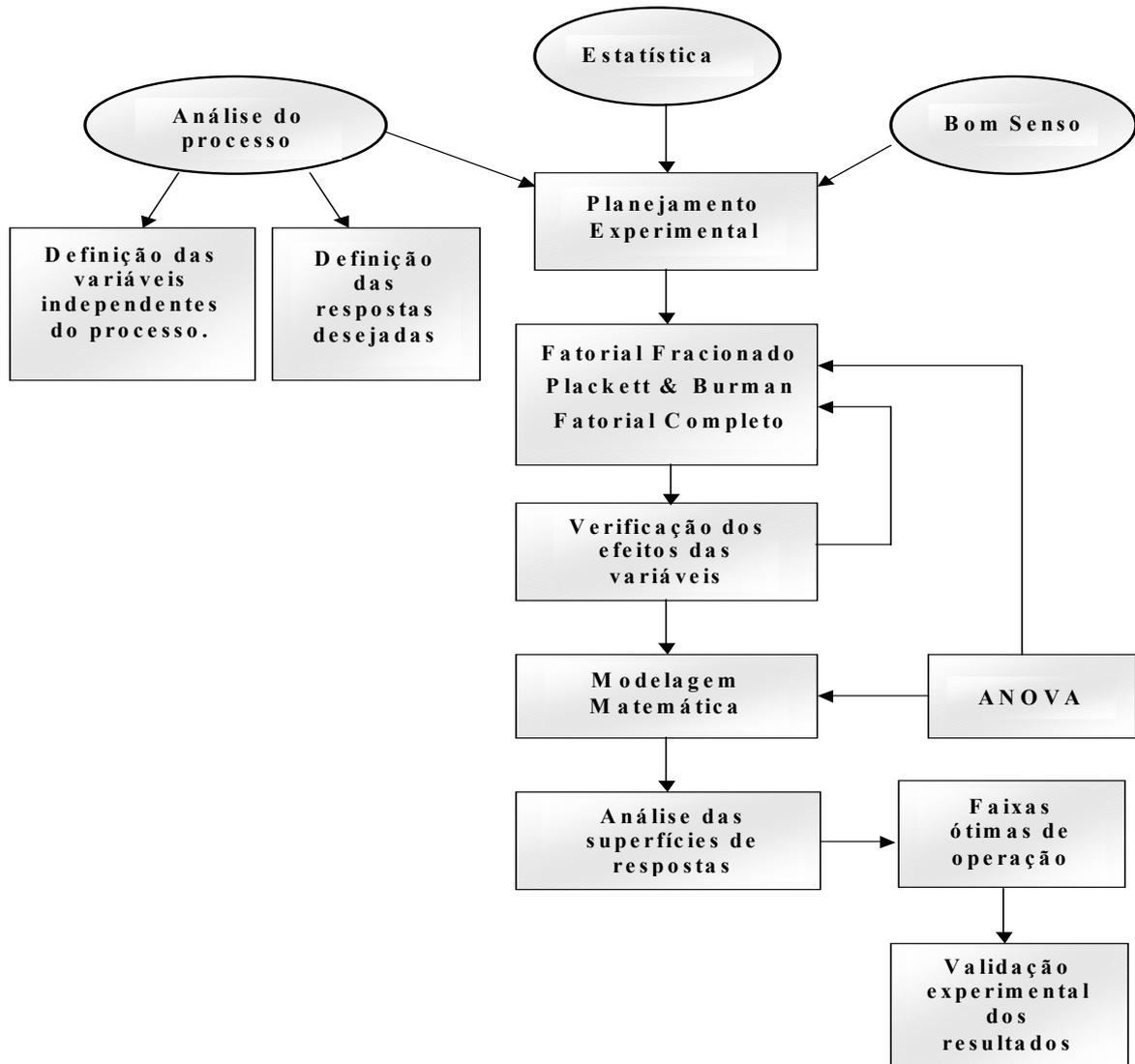


Figura C1: Fluxograma das etapas de otimização de um processo.

**ANEXO D**

## ANEXO D

### D.1 DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS DOS MATERIAIS PARTICULADOS

A distribuição granulométrica dos materiais pulverulentos investigados neste trabalho foi obtida pelo analisador Malvern Mastersize Microplus MAF 5001 no DEQ – UFSCar, e estão apresentadas na Figura 1. Verifica-se nesta figura que o material pulverulento inorgânico, o concentrado fosfático, possui uma faixa mais larga de distribuição granulométrica que os material pulverulento orgânico, o polvilho doce. O diâmetro médio ( $d_p$ ) da partícula do concentrado fosfático foi de 4,55  $\mu\text{m}$ , do polvilho doce foi de 14  $\mu\text{m}$ .

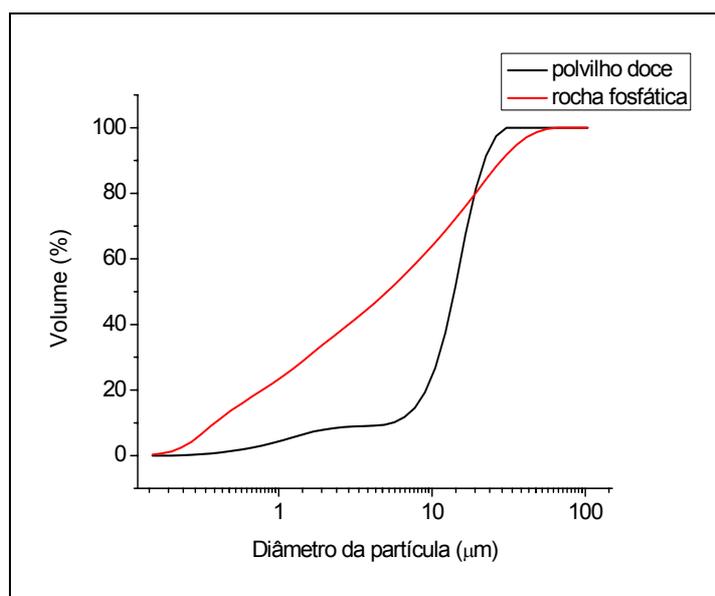


Figura D1 – Distribuição granulométrica das partículas de concentrado fosfático, de polvilho doce e de maisena, obtida no Malvern Mastersize Microplus MAF 5001 no DEQ – UFSCar.