

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

**FILTRAÇÃO DE GASES: ESTUDO DO FENÔMENO DA LIMPEZA  
POR BLOCOS.**

**Érica Flávia Tieni**

**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 para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Química.**

**SÃO CARLOS**

**2005**

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

T562fg

Tieni, Érica Flávia.

Filtração de gases: Estudo do fenômeno da limpeza por blocos / Érica Flávia Tieni. -- São Carlos : UFSCar, 2005.  
155 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Filtros de tecido. 2. Limpeza por blocos. 3. Fração de limpeza. 4. Remoção de torta. 5. Perda de carga residual. I. Título.

CDD: 667.1 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **ÉRICA FLAVIA TIENI**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS.

BANCA EXAMINADORA:

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Mônica Lopes Aguiar  
Orientadora, PPG – EQ/ UFSCAR.

Prof. Dr. José Antônio Silveira Gonçalves  
PPG – EQ/ UFSCAR

Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini  
UNAERP – RIBEIRÃO PRETO

## *AGRADECIMENTOS*

- Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus, porque sem a força Dele eu não estaria aqui neste momento.
- Em segundo lugar, à minha família, em especial, aos meus pais, Virgílio e Cleuza, que desde pequena me orientaram a buscar pelos caminhos corretos e sempre me incentivaram. Quero dedicar este trabalho também às minhas irmãs Évelyn e Natália, que são pessoas muito importantes na minha vida.
- À Professora Mônica Lopes Aguiar, pela paciência, sugestão e orientação indispensáveis, por toda sua dedicação, trabalho e empenho. É claro que eu não gostaria de agradecer somente à profissional Professora Mônica, mas gostaria também de agradecer a pessoa maravilhosa que a professora Mônica foi para mim. Gostaria de agradecer os momentos de conversa, a amizade, o otimismo e a compreensão. Todos estes fatores foram essenciais para a realização deste trabalho. Professora Mônica, é de coração que escrevo estas humildes palavras, para expressar o meu carinho e o meu respeito por você.
- À querida amiga Karina Bassan Rodrigues, que, durante todo meu Mestrado foi minha família em São Carlos. Foi minha amiga, minha irmã, até um pouco minha mãe e meu pai, me incentivando sempre, mas também sendo rígida nos momentos necessários. É com muita saudade que escrevo estas palavras, pois é difícil descrever uma pessoa tão querida, pequena no tamanho, mas grande no coração.
- Ao professor José Renato Coury, pela base fornecida durante as disciplinas específicas.
- Aos Professores José Antônio Silveira Gonçalves e Marlei Barbosa, que foram de fundamental importância nas correções e sugestões durante a qualificação de mestrado.

- Aos Professores José Antônio Silveira Gonçalves e Murilo Daniel de Mello Innocentini, pela disponibilidade da presença na defesa de mestrado.
- À Laura Marina Pinotti, que desde a minha chegada à São Carlos, me acolheu e se mostrou muito amiga.
- À Maria Magdalena Ferreira Ribas, uma pessoa que também merece meu respeito e minha admiração, pois também se mostrou muito amiga.
- Ao meu amigo Marcos Felicetti, pois como todo bom paranaense, me apoiou e me aconselhou sempre nos momentos difíceis.
- Às minhas amigas de faculdade Ivana, Dani, Roseli (bela), Adriana (Adri), Elisângela e Estela, com quem sempre mantive contato e nunca me faltaram nas horas difíceis.
- Ao meu amigo Góes, que foi muito importante durante todo o tempo que permaneci em São Carlos. Foi uma grande amizade que conquistei. Uma amizade que realmente valeu a pena.
- Ao meu amigo internacional Dimitrov, que sempre se mostrou disposto a me ajudar tanto no lado profissional quanto no lado pessoal.
- A todos os colegas do PPG – EQ, em particular, Juliana (Jú), Carol, Simone, Edmundo, Lissandra, Conceição, Alexandre (Ceará), Marcel, Juliana.
- À Wânia, pelos auxílios prestados no laboratório e pela amizade conquistada.
- Aos técnicos da oficina mecânica da Universidade Federal de São Carlos, Oscar e Valtinho, que se mostraram sempre muito prestativos.
- À CAPES, pelo apoio financeiro.
- Ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar, pela oportunidade e pelos equipamentos utilizados.
- À Gino – Cacciari pelo fornecimento do meio filtrante.

## *SUMÁRIO*

<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	i
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	iii
<b>RESUMO</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1. Filtração de gases.....	5
2.2. Filtros de Tecido (Filtros Manga).....	7
2.3. Métodos de remoção de tortas de filtração de gases.....	12
2.3.1 Vibração Mecânica.....	13
2.3.2 Fluxo de ar reverso.....	13
2.3.3 Pulso de ar reverso.....	14
2.4 Principais variantes para operação de filtros de tecido.....	15
2.4.1 Perda de carga no filtro.....	15
2.4.2 Velocidade de filtração.....	17
2.5 Eficiência de coleta de um filtro.....	17
2.6 Comportamentos típicos das curvas de filtração.....	22
2.7 Ciclos de filtração.....	23
2.8 Destacamento da torta de filtração.....	25
2.9 Remoção da torta por blocos.....	28
2.10 Principais estudos sobre a remoção da torta de filtração.....	30
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1 Aspectos gerais do equipamento de filtração.....	37

3.1.1 Caixa de filtração.....	37
3.1.2 Gerador de pó.....	39
3.1.3 Medidores de pressão e de vazão.....	40
3.1.4 Controle e direcionamento do escoamento do gás.....	41
3.1.5 Controle da umidade.....	41
3.2 Materiais.....	42
3.2.1 Material pulverulento.....	42
3.2.2 Meio filtrante.....	43
3.3 Realização dos ensaios.....	44
3.3.1 Ensaio de filtração.....	44
3.3.2 Remoção da torta.....	45
3.3.3 Análise das imagens.....	48
3.3.4 Tratamento dos dados.....	51
3.4 Metodologia utilizada para os cálculos das frações de área e de massa removida e da eficiência de limpeza.....	51
3.5 Variáveis e condições operacionais utilizadas nos ensaios de filtração e remoção da torta.....	52
3.6 Resumo dos ensaios realizados.....	53
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>54</b>
4.1 Comportamento da filtração e da regeneração do filtro, com a perda de carga máxima, para diferentes velocidades de limpeza.....	54
4.2 Comportamento da filtração e da regeneração do filtro, com a velocidade de limpeza, para diferentes perdas de carga máxima.....	66
4.3 Condicionamento do filtro.....	73
4.4 Influência da velocidade de limpeza na área total removida, para diferentes perdas de carga máxima, nos diferentes ciclos de filtração e limpeza.....	77
4.5 Influência do número de ciclos na área total removida.....	80
4.6 Influência das condições operacionais no tamanho dos pedaços removidos	81

4.6.1 Influência da perda de carga máxima no tamanho dos pedaços removidos.....	82
4.6.2 Influência da velocidade de limpeza no tamanho dos pedaços removidos.	85
4.7 Relação entre a porcentagem de pedaços removidos e a porcentagem da área total removida.....	90
4.8 Influência da distribuição de tamanho dos pedaços removidos na perda de carga residual.....	95
4.9 Influência do número de ciclos na quantidade dos pedaços removidos.....	102
4.10 Comparação entre as frações de massa e de área removida.....	104
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES.....</b>	<b>111</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO A - Dados experimentais.....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO B – Valores das umidades durante os experimentos.....</b>	<b>130</b>
<b>ANEXO C – Resultados das distribuições de tamanho dos pedaços de torta removidos.....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXO D – Variação das massas retida e removida, com o número de ciclos, para as diferentes condições experimentais.....</b>	<b>152</b>



## *LISTA DE SÍMBOLOS*

$\Delta P_T$  = queda de pressão total no filtro, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$\Delta P_m$  = queda de pressão no meio filtrante, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$\Delta P_c$  = queda de pressão devido a torta formada, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$\Delta P_R$  = perda de carga residual, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$\Delta P_{max}$  = perda de carga máxima durante a filtração, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$K_m$  = resistência específica do meio filtrante, [ M L<sup>-2</sup> t<sup>-1</sup> ].

$K_c$  = resistência específica da torta, [ t<sup>-1</sup> ].

$v$  = velocidade específica do gás, [ L t<sup>-1</sup> ].

$W$  = massa de pó depositada por unidade de área, [ M L<sup>-2</sup> ].

$S$  = arraste do filtro, [ M L<sup>-2</sup> t<sup>-1</sup> ].

$\Lambda$  = fator de rearranjo, [ - ]

$\Delta P_m$  = perda de carga residual medida experimentalmente após a regeneração do filtro, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$\Delta P_c$  = perda de carga comparativa à massa de pó separada durante a formação da torta, [ M L t<sup>-2</sup> ].

$f$  = fração de limpeza, [ - ].

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: (a) Diagrama esquemático da filtração de gás e (b) Esquema de formação da torta.....	6
Figura 2.2: Mecanismo de coleta por difusão (HINDS, 1999).....	19
Figura 2.3: Mecanismo de coleta inercial (HINDS, 1999).....	19
Figura 2.4: Mecanismo de coleta por interceptação direta (STRAUSS, 1975).	20
Figura 2.5: Mecanismo gravitacional de coleta.....	21
Figura 2.6: Mecanismo eletrostático de coleta.....	21
Figura 2.7: Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração.....	23
Figura 2.8: Exemplos de curvas características para filtros de ar.....	23
Figura 2.9: Comportamento do funcionamento de um filtro em caso de regeneração incompleta (“ <i>patchy cleaning</i> ”) com fluxo e concentração de pó constante.....	24
Figura 2.10: Figura 2.10: <i>Patchy cleaning</i> de cinza de um filtro granular de carboneto de silicone a altas temperaturas . (a) Destacamento de um pedaço isolado; (b) efeito casca de laranja, resultante de repetidos destacamentos aos pedaços.....	26
Figura 2.11: Distribuição da pressão no meio filtrante e na torta durante o fluxo reverso.....	28
Figura 2.12: Filtro parcialmente regenerado durante a limpeza por fluxo reverso.....	29
Figura 2.13: Ilustração do <i>patchy cleaning</i> . (a) Vista superior de um filtro rígido, mostrando em detalhes o “ <i>patchy cleaning</i> ” e (b) Filtro de poliéster com e superfície sofrida tratamento.....	33
Figura 3.1: Vista geral do equipamento de filtração.....	38
Figura 3.2: Foto ilustrativa da caixa de filtração.....	39
Figura 3.3: Esquema geral do alimentador de pó.....	40

Figura 3.4: Vista das colunas contendo sílica gel.....	42
Figura 3.5: Curva de distribuição granulométrica do material pulverulento, construída a partir dos resultados obtidos do programa MALVERN MASTERSIZER.....	43
Figura 3.6: Vista da superfície do filtro de poliéster tratado com um aumento de 50 vezes mostrando, em detalhes, o derretimento das fibras para facilitar a remoção de partículas.....	44
Figura 3.7: Vista do filtro no momento da remoção da torta de filtração.....	46
Figura 3.8: (a) Filtro com a torta de filtração após o primeiro ciclo de filtração e (b) filtro parcialmente limpo com velocidade de filtração igual a 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$ Pa, mostrando claramente o fenômeno do <i>patchy cleaning</i> .....	47
Figura 3.9: (a) Ilustração dos pedaços de torta arrancados na limpeza e (b) áreas marcadas, através do programa de análise de imagens, dos pedaços de torta arrancados na limpeza.....	48
Figura 3.10: Imagem obtida através de uma câmera digital após a limpeza do 1º ciclo a uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 1919$ Pa.....	49
Figura 3.11: Ilustração das áreas destacadas tratadas no programa Image Pro Plus.....	49
Figura 3.12: Fotografia obtida no 1º ciclo de filtração mostrando em detalhes as áreas removidas.....	50
Figura 3.13: Fotografia obtida no 10º ciclo de filtração mostrando em detalhes as áreas removidas.....	50
Figura 3.14: Esquema ilustrativo da contagem da área removida.....	52
Figura 4.1: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 13 cm/s, para as perdas de carga máxima de 1960, 2939 e 3919 Pa.....	55
Figura 4.2: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 5 cm/s, para as perdas de carga máxima de 1960, 2939 e 3919 Pa.....	57

Figura 4.3: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 10 cm/s, para as perdas de carga máxima de 1960, 2939 e 3919 Pa.....	58
Figura 4.4: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 16 cm/s, para as perdas de carga máxima de 1960, 2939 e 3919 Pa.....	59
Figura 4.5: Variação da massa retida, com a perda de carga máxima, para diferentes valores de velocidade de limpeza.....	62
Figura 4.6: Variação da massa removida, com a perda de carga máxima, para diferentes valores de velocidade de limpeza.....	62
Figura 4.7: Variação da eficiência de limpeza com a perda de carga máxima, para as velocidades de limpeza de 5,10,13 e 16 cm/s.....	64
Figura 4.8: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	67
Figura 4.9: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 2939 Pa.....	69
Figura 4.10: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3919 Pa.....	70
Figura 4.11: Variação da eficiência de limpeza, com a velocidade de limpeza, para diferentes espessuras de torta.....	71
Figura 4.12: (a) Variação da perda de carga residual e (b) massa retida, ambas em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza com $\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$ .....	74
Figura 4.13: (a) Variação da perda de carga residual e (b) massa retida, ambas em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza com $\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$ .....	75
Figura 4.14: (a) Variação da perda de carga residual e (b) massa retida, ambas em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza com $\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$ .....	77
Figura 4.15: Variação da área superficial limpa com a velocidade de limpeza, para diferentes perdas de carga máxima, nos diferentes ciclos de filtração.....	79

Figura 4.16: Variação da área total removida, com o número de ciclos, para as diversas combinações experimentais.....	80
Figura 4.17: Variação da área média dos pedaços de torta removidos, com a perda de carga máxima, para os ciclos 1,2,3,5 e 10.....	83
Figura 4.18: Torta de filtração obtida no 1º ciclo de filtração com $\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$ .....	84
Figura 4.19: Torta de filtração obtida no 1º ciclo de filtração com $\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$ .....	85
Figura 4.20: Variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho, com a velocidade de limpeza, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e primeiro ciclo de filtração.....	86
Figura 4.21: Variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho, com a velocidade de limpeza, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e primeiro ciclo de filtração.....	88
Figura 4.22: Variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho, com a velocidade de limpeza, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e primeiro ciclo de filtração.....	88
Figura 4.23: Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos na área total removida e (b) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	91
Figura 4.24: Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos na área total removida e (b) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 2939 Pa.....	93
Figura 4.25: Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos na área total removida e (b) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3919 Pa.....	94

Figura 4.26: Variação do número de pedaços removidos, com o número de ciclos, para as perdas de carga máxima de (a) 1960 Pa, (b) 2939 Pa e (c) 3919 Pa.....	103
Figura 4.27: Comparação entre as frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e diferentes velocidades de limpeza.....	105
Figura 4.28: Comparação entre as frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e diferentes velocidades de limpeza	107
Figura 4.29: Comparação entre as frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e diferentes velocidades de limpeza.....	108
Figura D1: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 5 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	153
Figura D2: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	153
Figura D3: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	154
Figura D4: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	154

## *LISTA DE TABELAS*

Tabela 2.1: Propriedades das fibras.....	9
Tabela 3.1: Exemplo da obtenção do tamanho médio dos pedaços removidos....	51
Tabela 3.2: Resumo dos ensaios experimentais.....	53
Tabela 4.1: Resumo da metodologia utilizada na apresentação dos pedaços de torta removidos.....	86
Tabela 4.2: Variação da distribuição da área média dos pedaços removidos, com o número de ciclos, para $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$ Pa e diferentes velocidades de limpeza.....	97
Tabela 4.3 Variação da distribuição da área média dos pedaços removidos, com o número de ciclos, para $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$ e diferentes velocidades de limpeza.....	98
Tabela 4.4: Variação da distribuição da área média dos pedaços removidos, com o número de ciclos, para $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$ Pa e diferentes velocidades de limpeza.....	99
Tabela A1: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 5cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$ Pa.....	118
Tabela A2: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 5cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$ Pa.....	119
Tabela A3: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 5cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$ Pa.....	120
Tabela A4: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$ Pa.....	121
Tabela A5: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$ Pa.....	122
Tabela A6: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$ Pa.....	123
Tabela A7: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$ Pa.....	124

Tabela A8: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$ Pa.....	125
Tabela A9: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$ Pa.....	126
Tabela A10: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$ Pa.....	127
Tabela A11: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$ Pa.....	128
Tabela A12: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$ Pa.....	129
Tabela B1: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 5 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	131
Tabela B2: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	131
Tabela B3: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	132
Tabela B4: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.....	132
Tabela C1: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s.....	134
Tabela C2: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s.....	135
Tabela C3: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s.....	136
Tabela C4: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s.....	137



Tabela C5: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s.....	138
Tabela C6: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s.....	140
Tabela C7: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s.....	142
Tabela C8: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s.....	143
Tabela C9: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s.....	145
Tabela C10: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s.....	147
Tabela C11: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s.....	148
Tabela C12: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s.....	150

## *RESUMO*

Este trabalho teve por objetivo estudar o fenômeno da limpeza por blocos na operação da filtração de gases, que acontece quando há a regeneração incompleta do filtro. Um parâmetro muito utilizado para caracterizar a limpeza por blocos é a fração de limpeza, que pode ser dada tanto como fração de área removida como fração de massa removida. Desta maneira, para investigar esse fenômeno, ensaios de filtração foram realizados, com o intuito de verificar o desempenho da limpeza no tecido de poliéster, para diferentes combinações de condições experimentais. Para caracterizar a limpeza por blocos, desenvolveu-se uma metodologia que consistiu em fotografar a torta ao final de cada limpeza, de modo a obter imagens das tortas parcialmente destacadas. A partir destas imagens, foi possível marcar as áreas removidas em um programa de análise de imagens. Os resultados gerais mostraram que: para a perda de carga máxima de 1960 Pa, o tecido apresentou comportamento de saturação a partir do segundo ciclo de filtração, e para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, a partir do quarto ciclo de filtração. Ao contrário do que se imaginava, a maior velocidade de limpeza não foi a que apresentou maior eficiência de remoção. A perda de carga residual apresentou íntima relação com a distribuição do tamanho dos pedaços removidos. Com relação ao fenômeno da limpeza por blocos, a área total removida não apresentou comportamento definido com o número de ciclos. Já a maior porcentagem dos pedaços removidos foi relativa aos pedaços com tamanho entre 0,1 e 1 cm<sup>2</sup>. A comparação entre as frações de massa e de área removida mostrou que o método proposto para quantificar a área removida na operação da filtração apresentou resultados bastante satisfatórios.

## *ABSTRACT*

This work had for purpose to study the phenomenon of patchy cleaning in the operation of the gas filtration, which happens when there is the incomplete regeneration of the filter. A parameter very used to characterize this phenomenon it is the cleaned fraction, which is defined as the ratio between the cleaned areas to the total area of filtration. In order to investigate the patchy cleaning behavior, filtration experiments were accomplished, with the intention to study the action of the cleaning in the fabric of polyester, for different combinations of experimental conditions. To characterize the cleaning for blocks, it has been developed a methodology that includes imaging of the blocks and computer program that analyzes these images of the cake at the end of each cleaning cycle. Using these images it was possible to mark the areas removed with the aim to obtain the size of the removed blocks. The general results showed that: for the maximum pressure drop of 1960 Pa, the fabric presented saturation behavior starting from the second filtration cycle, and for the maximum pressure drop 2939 and 3919 Pa, starting from the fourth filtration cycle. Unlike what was expected, the maximum cleaning velocity was not the one that gives the maximum removal of the cake. The residual pressure drop showed relationship with the distribution of the sizes of the removed blocks. Concerning the quantification of the removed blocks, the removed total area did not present defined behavior with the number of cycles. The largest percentage of the removed blocks presented size between  $0,1 \text{ e } 1 \text{ cm}^2$ . The area fractions and mass fractions removed presented curves with similar behavior. Besides, the two fractions presented very close values to each other, showing that the technique proposed in this work of quantification of the size of the removed areas presented quite satisfactory results.

## *1. INTRODUÇÃO*

O meio ambiente no qual vivemos muda continuamente devido a “causas naturais” sobre as quais temos pouco controle. As estações do ano são as mais evidentes dessas mudanças. Entretanto, há muitas outras variações naturais, tais como erupções vulcânicas, terremotos, furacões, inundações e queimadas em florestas, que afetam o meio ambiente (GOLDENBERG, 2003). Mas essas mudanças ocorreram lentamente ao longo do tempo, isto é, durante séculos. O que vamos discutir são mudanças causadas pela ação do homem, denominadas antropogênicas. Essas mudanças eram insignificantes no passado, mas após a Revolução Industrial no final do século XIX, e, particularmente no século XX, as agressões antropogênicas ao meio ambiente tornaram-se mais importantes, principalmente nos países industrializados (GOLDENBERG, 2003).

A Industrialização tem fornecido para a humanidade muitos benefícios materiais e sociais. Ao mesmo tempo tem trazido no seu despertar muitos problemas sociais e materiais. Um destes problemas é a poluição do meio ambiente.

Desde que a poluição seja concomitante com a maioria das atividades industriais, métodos de controle têm sido empregados. O melhor método de controle é evitar a poluição, substituindo os processos poluidores por um dos quais não poluam. Usualmente, isto não é possível, e então alguns métodos de controle devem ser instalados. Geralmente, métodos de controle da poluição adicionam custo ao processo, e, para a maior parte, o custo adicionado é passado ao público consumidor.

Entre os vários tipos de poluição geralmente reconhecidos, estão as poluições do ar, da água, do solo, poluições sonoras, térmicas, entre outras. É de nosso extremo interesse a poluição do ar, que será objeto deste estudo.

A poluição urbana do ar é, provavelmente, o produto indesejável mais visível da civilização (GOLDENBERG, 2003). O ar poluído é definido como ar mais um ou mais constituintes não normalmente presentes no ar ou presentes em concentrações maiores do que o normal. Os constituintes poluentes podem estar na forma de sólidos, de líquidos, de gases ou de vapores. As partículas microscópicas que flutuam no ar são de muitos tipos: partículas de sólidos suspensos, de fumaça, partículas fotoquimicamente formadas, etc (HINDS, 1999). Poluentes sólidos ou líquidos são referidos como particulados, e estas partículas poluentes aparecem bastantes distintas da fase gasosa quando vistas sob o microscópio.

Considera-se como material particulado disperso qualquer substância, à exceção da água pura, que existe como sólido ou líquido na atmosfera e tem dimensões microscópicas ou submicroscópicas, porém maiores que as dimensões moleculares (LORA, 2002). A emissão de material particulado merece muita atenção, principalmente os particulados prejudiciais à saúde humana.

Na luta para a preservação e qualidade do ar que respiramos é que limpadores de gases são utilizados para a remoção de partículas contidas nos gases. O aprimoramento de processos utilizados na remoção das partículas de correntes gasosas tem estado cada vez mais em pauta devido à grande preocupação com os problemas ambientais e as possíveis conseqüências para o bem estar da população mundial (MARTINS, 2001).

A filtração de ar vem predominando desde 1940 com a criação dos filtros de alta eficiência para ar contendo material particulado. Os filtros de tecido, ou filtros manga, estão entre os mais eficazes dispositivos de coleta de partículas. Eles podem obter frequentemente eficiências maiores do que qualquer outro tipo de unidade. Os filtros manga estão entre os mais comuns sistemas de filtração para controle da poluição do ar (HESKETH, 1996).

Durante a operação da filtração de gases, o gás “sujo” se faz passar através das mangas, ficando as partículas retidas no tecido. Após vários ciclos de filtração e limpeza, uma fração dos particulados fica retida permanentemente no tecido, formando a denominada torta de filtração ou “*cake*”, que, após um determinado tempo de filtração, constitui o meio filtrante definitivo (tecido+torta). Este fenômeno constitui a causa da alta eficiência dos filtros de mangas durante a filtração de pequenas partículas, onde a eficiência pode alcançar 99,9% (LORA, 2002).

A escolha deste tipo de filtro é devido às razões que incluem facilidade de operação, já que sua instalação é relativamente simples, e principalmente por sua grande eficiência na remoção de partículas de uma ampla faixa de tamanhos. Entretanto, estes filtros oferecem uma razoável resistência ao fluxo de gás (SILVA, 1999) devido à formação da torta de pó na superfície do filtro, aumentando a perda de carga no sistema. Devido a isto, a camada de pó deve ser removida periodicamente do tecido, a fim de se tornar o processo de filtração novamente viável.

Apesar da filtração de partículas sólidas ser objeto de numerosos estudos, o conhecimento relativo à limpeza do meio filtrante ainda é muito escasso (CALLE, 2002b).

Durante a limpeza, o destacamento da torta ocorre freqüentemente por um processo conhecido como “*patchy cleaning*”, ou limpeza por blocos, onde algumas áreas da torta são removidas completamente (exceto para uma fina camada residual) e outras não (KOCH, 1996). Isto provoca a chamada perda de carga residual ( $\Delta P_R$ ) após a etapa de limpeza, pois o filtro não retorna às suas propriedades iniciais, devido à torta de pó formada que não é totalmente removida. Como as partículas ficam aderidas no tecido, há um aumento na perda de carga residual, a qual pode alcançar um valor constante após vários ciclos de filtração e limpeza.

Um parâmetro muito utilizado, por muitos autores, para caracterizar a limpeza por blocos, é a fração de limpeza (CALLE et al. 2002a), definida como a razão entre a área limpa do filtro e a área total de filtração. Porém, essa caracterização também pode ser feita através da fração de massa (DITTLER e KASPER, 1999). A caracterização através da fração de massa é dada pela razão entre a massa de pó desprendida da torta, durante a limpeza, e a massa total da torta de pó no filtro.

Diante do exposto acima, o presente trabalho tem por objetivo realizar um estudo sobre o comportamento da remoção de torta de filtração de gases, em diferentes condições experimentais, onde as variáveis serão a velocidade de limpeza e a perda de carga máxima. Para tal finalidade, desenvolveu-se uma técnica para quantificar a área total de torta removida e o tamanho dos pedaços removidos.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Filtração de gases

A filtração pode ser definida como o processo de separação de partículas dispersas em um fluido através de meios porosos (PICH, 1987). A filtração é um meio simples, versátil e econômico para coletar amostras de partículas em aerossóis. É utilizada em diversas aplicações, como proteção respiratória, limpeza de ar dos efluentes de caldeiras, processo com materiais nucleares, limpeza de salas e recuperação de material particulado (HINDS, 1999).

A filtração pode ser classificada em duas grandes categorias, com base onde acontece a filtração no meio filtrante. Inicialmente, partículas entram em contato com a superfície do meio filtrante, podendo penetrar na estrutura do filtro. A filtração que ocorre dentro do meio filtrante é denominada de “deep filtration” ou filtração interna, em que o meio filtrante é responsável pela captura das partículas. Após um intervalo de tempo, ocorre a formação de uma camada de pó, formada na superfície do filtro, que passa a ser a responsável pela captura das partículas. Este tipo de filtração é usualmente denominada de filtração superficial (“*cake filtration*”). A maioria das filtrações é realizada por essa camada de pó, denominada de torta de filtração, que é formada na superfície do filtro. (DULLIEN, 1989).

Resumindo, a operação da filtração consiste basicamente na passagem de um gás contendo material particulado através de um meio filtrante, tendo como finalidade separar as partículas contidas na corrente gasosa. Depois de decorrido um determinado período de filtração, a camada de pó acumulada sobre o filtro, denominada torta de filtração, é que passa a desempenhar o papel de superfície filtrante (Figura 2.1).



A estrutura do tecido apenas fornece a sua superfície para capturar as partículas no início da filtração.

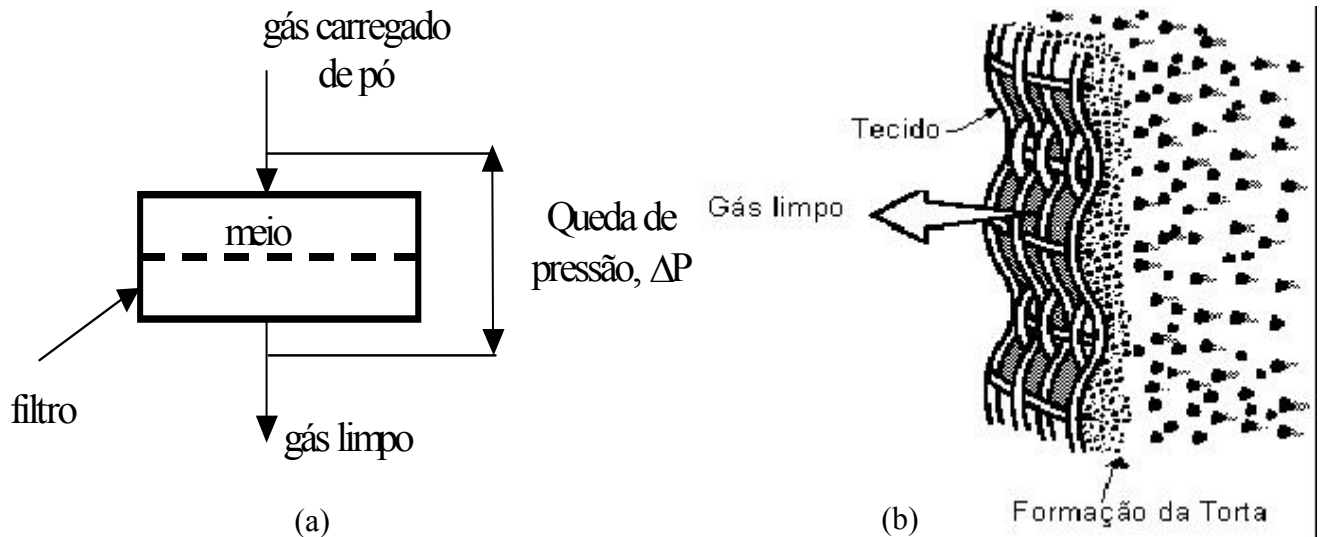


Figura 0.1: (a) Diagrama esquemático da filtração de gás e (b) Esquema de formação da torta.

Dois parâmetros muito utilizados para apresentar o desempenho de qualquer tipo de coletor de pó são a eficiência de filtração e a perda de carga. Em geral, estes parâmetros modificam com o acúmulo de pó na superfície do meio filtrante e com o envelhecimento do filtro (REMBOR, 1996).

No processo de filtração, onde acontece a deposição de aerossóis sólidos no meio filtrante e a torta é acumulada, ocorre um aumento da perda de carga através do meio, como está ilustrado na Figura 2.1 (a). A perda de carga, como já citado, é um parâmetro muito importante na operação da filtração. Com o acúmulo das partículas, a espessura da torta aumenta (Figura 2.1 (b)), fazendo com que a perda de carga do filtro também aumente. Após algum tempo de filtração, um certo valor de perda de carga é alcançado e se torna necessária a limpeza do filtro. Os depósitos de torta são então removidos periodicamente através da limpeza do tecido, de forma a manter a queda de pressão através do filtro dentro dos limites práticos de operação.

## 2.2 Filtros de Tecido (Filtros Manga)

A idéia de usar filtros de tecido para limpar o ar não é recente. A filtração em filtros de tecido era usada desde o Antigo Egito, 5000 anos atrás. Na era bíblica, sacos trançados eram colocados em cima da cabeça e amarrados ao redor do pescoço para proteger contra minérios expostos de pó de óxido de chumbo (MYCOCK et al, 1995).

Avanços vieram lentamente. Leonardo Da Vinci defendeu o uso de panos molhados (wetting cloth) que eram colocados sob a boca e o nariz para melhorar a eficiência da respiração (filtração). Em 1852, S.T. Jones patenteou nos U.S.A um simples projeto de uma manga para a recuperação de fumaças de óxido de zinco. A partir de 1880, metalúrgicas passaram a utilizar filtros com milhares de mangas nas indústrias de fundição de zinco e chumbo. Com o desenvolvimento de novos tecidos sintéticos em 1950, a filtração em filtros de tecido entrou na era moderna (MYCOCK et al, 1995).

Um filtro manga é essencialmente um sistema contendo um filtro de tecido no qual retira partículas de uma corrente gasosa. O gás limpo é então ventilado para a atmosfera. O particulado pode ser um produto, como o negro de fumo, ou um subproduto, como cinza produzida pela queima de carvão. Quando o particulado é um subproduto, este pode ser reciclado e retornar ao processo, que é o caso, principalmente, do carvão não queimado.

O tipo do tecido selecionado para ser usado na filtração depende da temperatura e acidez da corrente de gás, das características do pó, da razão de filtração gás/tecido e do tipo de limpeza das mangas a ser empregada.

A performance de um filtro de tecido depende da escolha adequada da fibra, que deve ser compatível com o ambiente gás/partícula, de um projeto apropriado da geometria do coletor de pó e das condições de limpeza do coletor (BILLINGS, 1970). Para baixas concentrações de partículas, os filtros fibrosos são uma das soluções mais requeridas (REMBOR, 1996).

A produção de tecidos começa com uma unidade estrutural básica, que consiste de uma simples fibra. As fibras nos quais os filtros de tecidos são confeccionados se originam da natureza ou de processos industrializados (DONOVAN, 1985).

As fibras naturais podem ser de origem animal, vegetal ou mineral. Filtros com alta qualidade têm sido confeccionados a partir de fibras de algodão e de lã, mas devido as limitações de temperatura, estes tecidos não têm sido aplicados na filtração de fontes de combustão. Foi somente nos últimos 50 anos que, com o desenvolvimento das fibras têxteis sintéticas, houve o aumento no uso dos filtros de tecido, porque os tecidos passaram a ter alta qualidade e capacidade de resistir a operação a altas temperaturas, que são as requeridas das fontes de combustão de gases. As novas fibras sintéticas têm oferecido uma maior aplicação na filtração em filtros de tecido (DONOVAN, 1985). Isto se deve ao baixo custo, a maior resistência química e mecânica e o menor diâmetro das fibras (MARTINS, 2001). Como exemplos de fibras sintéticas tem-se o nylon, o poliéster, o acrílico, o polipropileno, o teflon, entre outras. A Tabela 2.1 ilustra as principais propriedades de algumas fibras.

Tabela 2.1: Propriedades das fibras. (Fonte: DONOVAN, 1985)

Fibra	Resistência ácida	Resistência alcalina	Resistência ao calor		Resistência à abrasão
			Max °C	Pico °C	
Algodão	Destruída por ácidos concentrados ou diluídos	Resistente, mas incha ao menos sendo submetido a tratamento	100	120	Moderada à boa
Nylon	Reage com ácidos minerais de todas as concentrações	Boa resistência até mesmo para álcalis concentrados fervendo	100	120	Excelente
Poliéster	Boa resistência para 30% HCl 50% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> à 50°C	Resistência moderada mas risco de hidrólise	150	180	Excelente
Acrílico (Dupont)	Boa resistência para 30% HCl 50% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> à 50°C	Resistência moderada até mesmo à altas temperaturas	130	160	Moderada à boa
Acrílico (Bayer)	Resistente para HCl concentrado e 50% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Boa resistência: por exemplo— resistente à 25% KOH	140	170	Moderada à boa
Polipropileno	Não afetado para ácidos concentrados exceto agentes oxidantes	Não afetado por álcalis concentrados, exceto agentes oxidantes	100	120	Boa
Teflon	Resistente à ácidos diluídos até mesmo à altas temperaturas	Resistente	230	280	Razoável
Vidro	Resistente à todos exceto HF e H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> quente	Atacado por álcalis fortes	285	315	Fraco

Muitos tecidos utilizados na filtração de gases são confeccionados completamente ou parcialmente por fibras trançadas. Existe também os tecidos não trançados, ou feltros, os quais são feitos diretamente a partir da ligação de fibras sem a preparação do fio requerida no entrelaçamento.

A maior parte dos tecidos são trançados ou parcialmente trançados. Os filtros manga no qual o gás flui de dentro das mangas para fora usam quase que exclusivamente tecidos trançados (MYCOCK et al, 1995). Exemplos destes tipos de filtros seriam os filtros manga com sistema de limpeza por ar reverso e por vibração mecânica. Os filtros de tecido trançados oferecem baixa resistência ao fluxo de gás e seu acabamento flexível confere boa característica de liberação.

Os tecidos não trançados ou feltros são mais apropriados para filtros manga com sistema de limpeza por jato pulsante, que oferece elevada energia para limpeza e alto fluxo operacional de gás. Filtros não trançados trabalham bem com pó mais pesado como areia seca, pedra calcária, e grãos. Em geral, os tecidos não trançados possuem vida útil mais longa das mangas, porém eles oferecem maior resistência ao fluxo de gás do que os tecidos trançados (MYCOCK et al, 1995).

O modo no qual o tecido é confeccionado é uma das características que determinam a deposição e a liberação do pó (MARTINS, 2001). Embora não se tenha um conhecimento detalhado sobre isto, sabe-se que apenas uma superfície lisa libera o pó com mais facilidade do que uma superfície felpuda, porque o pó pode aglomerar em fibras soltas, que durante a limpeza, pode soltar-se das fibras e voltar à corrente de gás, tornando a limpeza pouco eficiente.

Para melhorar a eficiência de limpeza dos filtros são realizados alguns tratamentos no acabamento do tecido. CALLÉ (2002b) estudou o comportamento da

remoção da torta de pó em filtros de poliéster com e sem superfície tratada. Seus estudos mostraram que o destacamento da torta de pó foi melhor para o filtro com a superfície tratada, tornando o processo de limpeza mais ativo. Isto confirma que o tecido com a superfície tratada aumenta a quantidade de partículas removidas através da limpeza.

Os tecidos normalmente são tratados para melhorar a estabilidade mecânica. Podem ser tratados com silicone para facilitar a liberação da torta. Tecidos naturais (lã e algodão) normalmente são pré-lavados para evitar o encolhimento da manga durante a operação. Tecidos naturais e sintéticos normalmente sofrem tratamentos térmicos, físicos e químicos. Alguns destes processos são descritos a seguir.

Calandragem (“*Calendering*”) é o processo no qual as fibras do tecido são pressionadas através de rolos para aplainar ou alisar o material. O objetivo é dar uma superfície mais uniforme para o tecido (DONOVAN, 1985).

Escovação (“*Napping*”) é um processo que promove a raspagem da superfície do filtro causando um aumento na superfície das fibras aumentando a área de coleta de partículas.

Chamuscagem (“*Singeing*”): este tipo de processo usa uma chama para queimar e eliminar as fibras salientes do tecido.

Vitrificação (“*Glazing*”): neste processo submete-se às fibras a altas pressões e elevadas temperaturas. As fibras fundidas são envolvidas em resina natural ou sintética. Este tratamento melhora a resistência mecânica do material (DONOVAN, 1985).

Três fatores podem encurtar a vida útil operacional de uma manga. Eles estão relacionados com as condições do fluxo de gás, durabilidade do tecido, abrasão e

ao ataque químico. A principal delas é o limite superior de temperatura que o tecido resiste ou a durabilidade térmica. Deve-se consultar o fornecedor do material para garantir que a operação seja feita na faixa de tolerância do tecido. O gás pode também ser resfriado antes de ser filtrado, porém deve-se garantir que não haja muita umidade e que os ácidos não condensem nas mangas (MCKENNA, 1992).

Outro problema freqüentemente encontrado na operação de filtros de mangas é a abrasão. A abrasão pode ser resultante da fricção das mangas umas contra as outras e da solitação de forças feita no processo de limpeza.

O método de concretização da limpeza das mangas também é muito importante. O material tem que ter resistência mecânica suficiente para suportar as vibrações ou o impacto do gás de limpeza. Os principais métodos de remoção da torta de filtração serão mostrados a seguir.

### **2.3 Métodos de remoção de tortas de filtração de gases**

Quando os gases sujos passam através do filtro de tecido, as partículas sendo removidas do gás são coletadas nas fibras por mecanismos de coleta, que serão discutidos no próximo item. Então, a torta é formada com as partículas coletadas, e a queda de pressão através do tecido aumenta. Quando a torta atinge uma espessura ótima para remoção, estabelecida pela queda de pressão máxima, esta precisa ser destacada do filtro por métodos de limpeza (STRAUSS,1975).

Desta forma, uma das questões mais importantes a considerar em qualquer filtro de mangas é a limpeza. Uma limpeza inadequada provoca o acréscimo da

queda de pressão residual. Por outro lado, uma limpeza muito vigorosa pode danificar o filtro, reduzindo o período de vida útil do mesmo (LORA, 2002).

Para realizar a limpeza dos filtros de tecido, existem três grandes métodos de limpeza: vibração mecânica (shaker), fluxo de ar reverso (reverse flux) e pulso de ar reverso (pulse jet). Eis, a seguir, uma explicação sobre estes métodos de destacamento.

### **2.3.1 Vibração Mecânica**

A técnica de limpeza por vibração mecânica apresenta uma montagem relativamente simples e um baixo custo de implantação e manutenção, sendo apropriada para sistemas de pequeno e médio porte (MOREIRA, 1998). Este sistema de limpeza remove o pó coletado da superfície do tecido vibrando mecanicamente a manga por meio de um motor, e a aceleração no tecido é função da amplitude e da frequência da vibração. A energia repassada ao tecido então, pode ser suficiente para romper as ligações adesivas entre o meio filtrante e a torta ou ligações coesivas dentro da estrutura do tecido (MOREIRA, 1998). É provavelmente a mais antiga técnica de limpeza e é atualmente empregada sob uma grande faixa de capacidades das mangas. Nesta técnica, o fluxo de gás sujo através das mangas é interrompido durante o processo de limpeza.

### **2.3.2 Fluxo de ar reverso**

Neste tipo de sistema de limpeza, o ar limpo é soprado através das mangas, no sentido oposto ao fluxo normal, para desalojar a camada de partículas. Este método possui uma montagem bastante simples no qual a inversão do fluxo gasoso normalmente se dá por uma combinação de válvulas (AGUIAR, 1995). O ciclo de limpeza termina quando uma quantidade significativa de pó é extraída, resultando na



redução da perda de carga. Normalmente, estipula-se um tempo de limpeza, este deve ser suficiente para remover a máxima quantidade de pó do tecido. Deste modo, esta técnica exige a interrupção da filtração durante a limpeza.

Quando a limpeza é atingida por velocidades do gás relativamente baixas, o tecido não é exposto a um movimento violento, e, por conseguinte, aumenta o tempo de vida útil das mangas, sendo esta uma das vantagens dessa técnica de limpeza (MCKENNA, 1992).

### **2.3.3 Pulso de ar reverso**

Neste tipo de limpeza, a torta é periodicamente removida por um pulso de ar comprimido através do tecido, causando uma repentina expansão das mangas, fazendo com que o pó caia para fora do meio filtrante (MCKENNA, 1992). Neste método, a duração da limpeza é menor do que a dos métodos por fluxo de ar reverso e por vibração mecânica. Geralmente, não é necessário interromper o processo de filtração porque o fluxo acontece em frações de segundos. Esta técnica de limpeza das mangas é bastante efetiva, porém, o vigor da técnica tende a limitar o tempo de vida das mangas, e também tende a aumentar a migração de pó através do tecido, diminuindo assim a eficiência de coleta do pó.

Para este estudo adotou-se como técnica de remoção da torta de filtração o fluxo de ar reverso, pois esta técnica permite uma melhor visualização do destacamento da torta, durante toda a etapa de limpeza, além de ser uma técnica em que o tecido não é sujeito a um movimento violento do gás.

## **2.4 Principais variantes na operação de filtros de tecido**

O sucesso no projeto e na operação de filtros de tecido depende de uma interação entre quatro variáveis de projeto: a perda de carga, a velocidade de filtração, o meio filtrante e a técnica de limpeza (SEVILLE, 1997). Eis a seguir uma breve explicação acerca da perda de carga e da velocidade de filtração, uma vez que já foi discutido sobre o meio filtrante no item 2.2, e sobre a limpeza do filtro no item 2.3.

### **2.4.1 Perda de carga no filtro**

A perda de carga em um filtro tende a aumentar em proporção à quantidade de partículas coletadas. O aumento da perda de carga durante o ciclo de filtração é muito importante, uma vez que determina a frequência de limpeza do filtro e conseqüentemente afeta o tempo de vida do tecido (JEON, 2004). Além disso, a máxima perda de carga, antes da limpeza, pode ser empregada para determinar a potência requerida. Normalmente, a perda de carga é o fator limitante que decide quando a limpeza deve começar. Desta maneira, os ciclos de limpeza são solicitados, através do controle da perda de carga, ou seja, quando um máximo valor de perda de carga máxima é alcançado. Os valores das perdas de carga operacionais são geralmente na faixa de 750 a 2000 Pa ( SEVILLE, 1997).

A perda de carga é uma importante variável de projeto, 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 entrada e saída. É normalmente expressa em unidade de Pascal ou milímetros de água (SEVILLE, 1997).

Existem diferentes equações para descrever a queda de pressão durante a filtração. Uma delas é uma aproximação cumulativa, onde se divide a queda de pressão total no filtro em duas partes: a queda de pressão no meio filtrante,  $\Delta P_m$ , e a queda de pressão devido à torta de filtração formada,  $\Delta P_c$ . Desta maneira, tem-se a equação (1):

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_c \quad (1)$$

A lei de Darcy pode ser usada para descrever a queda de pressão através de um meio filtrante e da torta de filtração, quando a filtração é conduzida a baixos valores de número de Reynolds. Desta maneira, a Equação (2) é então denominada equação da filtração:

$$\Delta P_T = K_m \cdot v + K_c \cdot v \cdot W \quad (2)$$

Sendo  $K_m$  = resistência específica do meio filtrante

$K_c$  = resistência específica da torta

$v$  = velocidade superficial do gás

$W$  = massa de pó depositada por unidade de área

Se ambos os lados da Equação 2 forem divididos por  $v$ , obtém-se a Equação (3):

$$\frac{\Delta P_T}{v} = S = K_m + K_c \cdot W \quad (3)$$

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, pois o seu uso preserva o conceito da propriedade da camada do meio, independente da velocidade de escoamento (DONOVAN, 1985).

#### **2.4.2 Velocidade de filtração**

A velocidade do gás na interface do tecido é denominada de velocidade de filtração, podendo ser expressa, por exemplo, em m/min ou cm/s. É um parâmetro fundamental de projeto para filtros de tecido.

A velocidade de filtração determina a área total efetiva do tecido necessária para limpar um fluxo volumétrico requerido (SEVILLE, 1997). Em conjunção com o método de limpeza, determina as dimensões do filtro. Conseqüentemente, tem uma influência significativa no custo inicial do equipamento e no custo da potência e da manutenção. A velocidade de filtração utilizada em qualquer aplicação de filtração depende das características do pó, da distribuição do tamanho das partículas, da concentração de entrada do pó, da temperatura do gás, do método de limpeza do filtro e do tipo de tecido. Para a maioria das aplicações, a faixa utilizada é de 0,3 – 3,7 m/min (0,5 – 6,2 cm/s). Valores típicos para velocidade de filtração, para uma ampla faixa de tipos de materiais pulverulentos podem ser encontrados em SEVILLE (1997).

#### **2.5 Eficiência de coleta de um filtro**

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 filtração, é necessário que haja contato físico entre partícula e coletor. Além

disso, é necessário que a partícula fique retida no coletor (COURY, 1986). 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).

Em qualquer caso, a importância destes mecanismos varia com o tamanho e a velocidade das partículas, com a superfície de coleta e com a presença de forças eletrostática, gravitacional ou atração (ou repulsão) (STRAUSS, 1975).

Os mecanismos de coleta básicos são: impactação inercial, interceptação e difusão. As forças eletrostáticas, térmicas e gravitacionais modificam a eficiência de coleta do filtro em circunstâncias especiais. Sob circunstâncias normais, as forças térmicas são desprezíveis na filtração, porque, para ser efetiva, diferenças de temperatura muito grandes entre as partículas e os corpos coletores são indispensáveis. Na prática, devido às pequenas dimensões da fibra coletora, estas têm uma baixa capacidade calorífica e rapidamente alcançam a temperatura da corrente de gás. Devido à curta duração de qualquer diferença de temperatura, forças térmicas geralmente não são consideradas (STRAUSS, 1975).

A seguir serão ilustrados os principais mecanismos mecânicos de coleta.

#### (a) Mecanismo Difusional

Este mecanismo funciona bem para partículas menores e, de fato, 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 tem tão pouca massa que podem ser influenciadas por um bombardeamento de moléculas de gás ao redor da partícula (BILLINGS, 1970). A Figura 2.2 representa a partícula sendo

bombardeada por moléculas de gás e tendo seu caminho afetado até finalmente colidir na fibra e ser coletada.

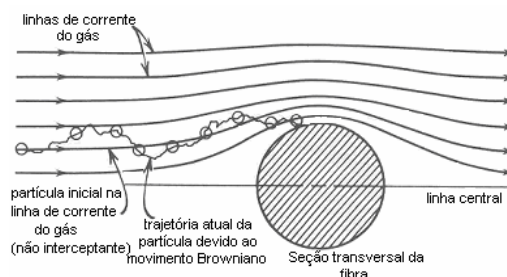


Figura 2.2: Mecanismo de coleta por difusão (HINDS, 1999).

### (b) Mecanismo Inercial

Neste tipo de mecanismo é assumido que a partícula tem massa e, por conseguinte, inércia. A Figura 2.3 mostra este mecanismo de coleta.

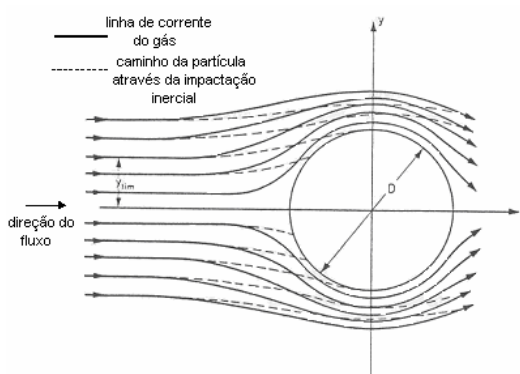


Figura 2.3: Mecanismo de coleta inercial (HINDS, 1999).

A linha de corrente de gás não pode passar através da fibra e então passa ao redor da fibra. Se a partícula não tem massa, ou se for muito leve, a partícula pode seguir a linha de corrente de gás e contornar a fibra e escapar da captura. Porém, devido ao fato de a partícula ter massa, a partícula “desliza” da linha de corrente de gás, choca-se contra fibra, e é coletada. Este mecanismo de coleta é efetivo para partículas de aproximadamente  $10\ \mu\text{m}$  ou maiores.

## (c) Interceptação direta

A coleta por interceptação direta acontece porque a partícula tem tamanho finito (AGUIAR, 1991). Se uma partícula de tamanho finito passa perto de um obstáculo como resultado de (a) difusão, (b) inércia, ou (c) por causa do movimento do fluido somente, o contato pode ocorrer se a trajetória do centro da partícula passar a uma distância de um raio de partícula da superfície (BILLINGS, 1970). A Figura 2.4 mostra o esquema desse mecanismo de coleta.

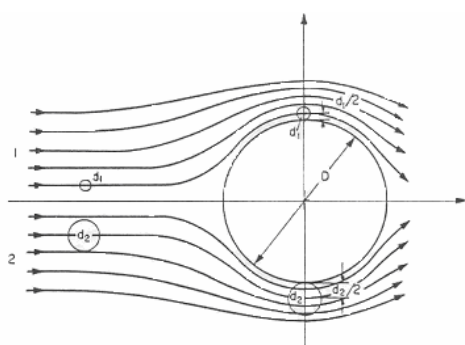


Figura 2.4: Mecanismo de coleta por interceptação direta (STRAUSS, 1975).

## (d) Mecanismo gravitacional

O mecanismo gravitacional é o resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, que causa um desvio na sua 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. A Figura 2.5 mostra um exemplo desse mecanismo, sendo o fluxo de cima para baixo.

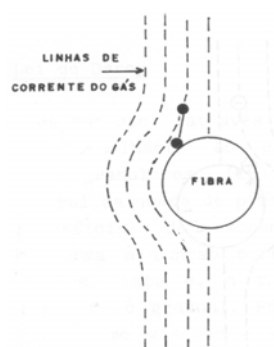


Figura 2.5: Mecanismo gravitacional de coleta.

(e) Forças eletrostáticas

Além dos mecanismos denominados mecanismos mecânicos, vários estudos têm demonstrado que as forças eletrostáticas podem ser de grande importância no processo de filtração (COURY, 1986). Tais forças podem proporcionar aumento na eficiência de filtração e, no caso de existência de torta, causar a formação de tortas menos compactas, que oferecem menor 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).

A geração de cargas eletrostáticas nas partículas e/ou coletores de um filtro pode ocorrer espontaneamente por choque ou atrito, ou pode ser introduzida ao sistema (corrente corona, por exemplo). A Figura 2.6 mostra um exemplo de coleta eletrostática onde existe a atração entre a partícula carregada e o coletor carregado com carga oposta.

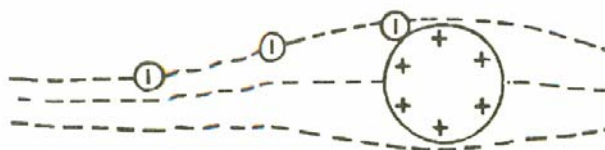


Figura 2.6: Mecanismo eletrostático de coleta (COURY, 1986).



Outra consideração a ser feita acerca dos mecanismos de coleta descritos anteriormente é que eles não levam em conta o efeito das partículas já coletadas no comportamento do filtro (COURY, 1986). A validade das expressões restringe-se somente aos estágios iniciais da filtração, ou seja, quando o filtro ainda está limpo. Na maioria dos casos práticos, o comportamento do filtro varia bastante com o acúmulo de material coletado no filtro, resultando num comportamento dependente do tempo, denominada filtração não estacionária (COURY, 1986).

A eficiência de filtração, em qualquer filtro, depende do mecanismo de coleta. Os filtros de tecido de utilidade industrial têm tido constantemente uma eficiência de 99,9% (HESKETH, 1996). Contudo, expressões para o cálculo da eficiência dos mecanismos citados acima podem ser encontradas facilmente na literatura (COURY, 1986; HINDS, 1999; STRAUSS, 1975).

## **2.6 Comportamentos típicos das curvas de filtração**

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 2.7. Segundo Dennis (1982), citado por Aguiar (1991), a curvatura com concavidade para baixo é a mais comum. 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.

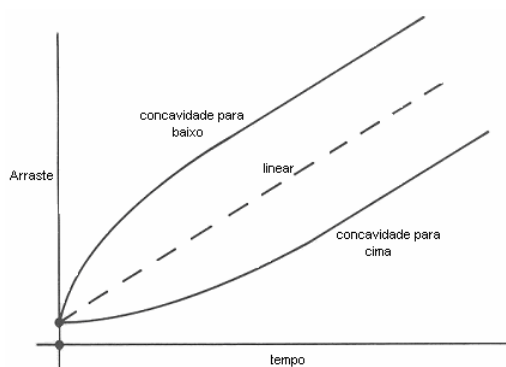


Figura 2.7: Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração.

Uma curva que também pode representar o sistema operante é a relação entre a queda de pressão e a massa específica do pó coletado no meio (esta é proporcional ao volume de gás filtrado, a um carregamento constante) (SVAROVSKY, 1981). Como pode ser observado na Figura 2.8, a curva toma uma forma diferente para cada tipo de tecido. Para tecidos trançados existe inicialmente um rápido aumento na queda de pressão, devido ao entupimento dos poros. Já para os feltros, a filtração inicial profunda é seguida por filtração na superfície, com característica linear.



Figura 2.8: Exemplos de curvas características para filtros de ar (SVAROVSKY, 1981).

## 2.7 Ciclos de filtração

Como foi citado no item anterior, a curva de filtração pode assumir três comportamentos distintos. No entanto, esses comportamentos são assumidos somente para o primeiro ciclo de filtração. Após a regeneração do filtro, o comportamento da curva pode mudar substancialmente, dependendo do comportamento da limpeza, ou seja, se o filtro foi limpo completamente ou não. Normalmente, a limpeza ocorre por um fenômeno conhecido como “*patchy cleaning*”, ou limpeza por blocos, que tem como característica a regeneração incompleta do filtro. Isto ocorre porque, segundo KOCH (1996), a tensão aplicada para remoção se concentra em falhas ou na heterogeneidade da torta, gerando rachaduras que se propagam. De acordo com CHEUNG (1988), citado por DUO (1997), embora a completa limpeza do filtro seja ideal para muitas aplicações de filtração, a forte ação da limpeza requerida pode não ter custo efetivo e pode também ser prejudicial para o meio filtrante. Desta maneira, filtros são geralmente operados sob condições de *patchy cleaning*.

Durante a operação da filtração, devido à regeneração incompleta do filtro, a curva de filtração muda de comportamento após a primeira regeneração, como mostra a Figura 2.9. Essa figura mostra o comportamento da perda de carga em função do tempo de filtração, onde não ocorreu a limpeza total do filtro, ou seja, permaneceram pedaços de torta na superfície do filtro.

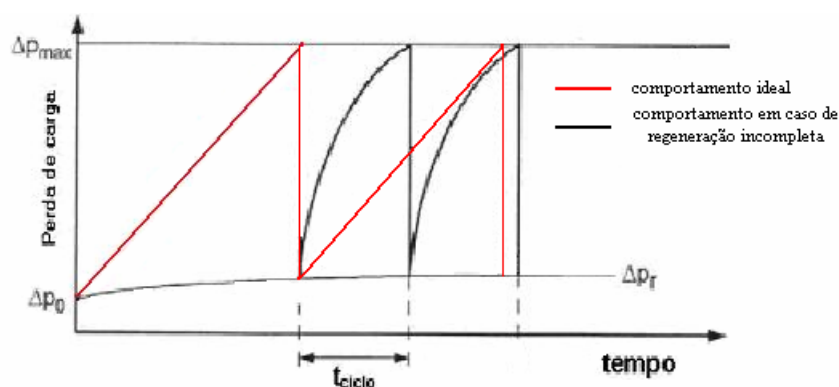


Figura 2.9: Comportamento do funcionamento de um filtro em caso de regeneração incompleta (“*patchy cleaning*”) com fluxo e concentração de pó constante. (VDI, 2003).

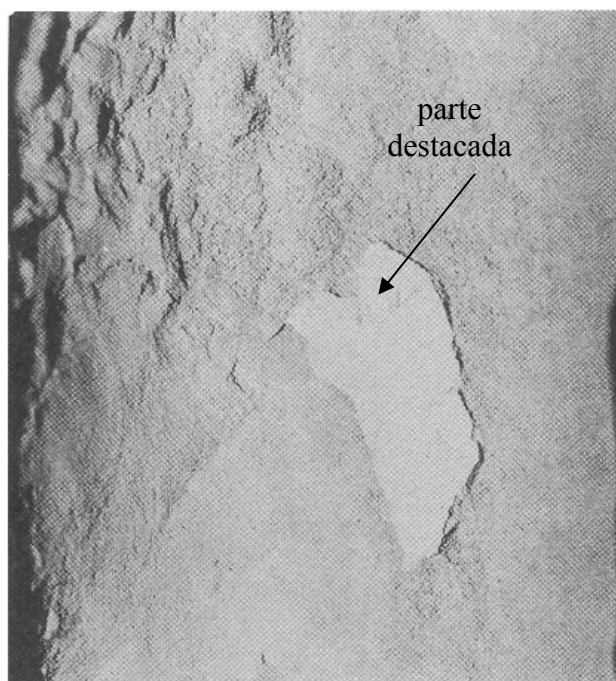
Por meio da Figura 2.9, verifica-se que, enquanto no primeiro ciclo, a curva mostra um comportamento ideal, com um aumento linear da perda de carga com o tempo. Após a primeira regeneração, a curva muda substancialmente sua concavidade (DITTLER E KASPER, 1999). Neste caso, o percurso da perda de carga durante o ciclo de filtração se torna convexo em relação ao percurso da perda de carga em caso de funcionamento ideal. (VDI, 2003).

No caso de fluxo constante, a velocidade de filtração é maior nas áreas regeneradas do filtro, e devido a esse aumento na velocidade local de filtração, a aglutinação de pó no filtro forma-se principalmente nas áreas regeneradas (VDI, 2003). KAVOURAS E KRAMMER (2003) afirmaram que a limpeza por blocos resulta na distribuição desigual da espessura da torta e na velocidade não uniforme durante a filtração. DITTLER E KASPER (1999) concluíram que a torta de pó cresce principalmente nas áreas regeneradas do meio filtrante no início do ciclo de filtração. Já nas áreas onde não aconteceu a remoção da torta de pó, a torta de pó cresce significativamente no final dos ciclos de filtração.

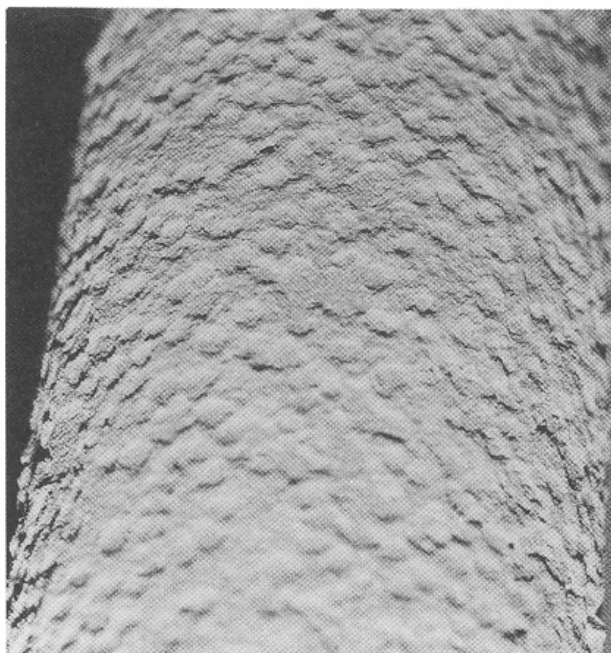
## **2.8 Destacamento da torta de filtração**

Para uma torta ser removida do tecido, uma força necessária deve ser aplicada para quebrar as forças adesivas que unem a torta ao tecido ou a coesão interna da torta (MORRIS e ALLEN, 1996). Na teoria, assim que a força dessa união adesiva e/ou coesiva é excedida, por qualquer mecanismo de limpeza, a torta se destaca simultaneamente em toda parte. Na prática, entretanto, nem a força adesiva/coesiva da torta nem a tensão aplicada são inteiramente uniformes através da superfície do filtro,

resultando, desta forma, no fenômeno conhecido como *patchy cleaning*, ou limpeza por blocos (SEVILLE,1997), como mostra a Figura 2.10.



(a)



(b)

Figura 2.10: *Patchy cleaning* de cinzas em um filtro granular de carbeto de silício a altas temperaturas . (a) Destacamento de um pedaço isolado; (b) efeito casca de laranja, resultante de repetidos destacamentos aos pedaços (De SEVILLE et al, 1991; In SEVILLE, 1997).

A adesão da torta, incluindo também os efeitos de coesão, é um fator primário nas falhas de filtros de tecido. Ela determina quanta energia deve ser colocada no sistema durante a etapa de limpeza.

Segundo LEITH e ALLEN (1986), citado por MORRIS e ALLEN (1996), a adesão da torta aumenta com a espessura, ou mais exatamente, com o carregamento de torta ( $\text{g/m}^2$ ). Já segundo SIEVERT e LOEFFLER (1987), citado por SEVILLE (1989), a limpeza é mais fácil se a massa de torta de pó depositada é maior. Em contraste com estes resultados, SEVILLE (1989) mostrou que a tensão que deve ser aplicada para superar a adesão da torta no meio ou a coesão na torta é independente do carregamento da torta.

Segundo De RAVIN (1986), citado por KOCH (1996), sua conclusão geral foi que a tensão de remoção da torta (geralmente na faixa de 50 – 200 Pa) é independente do carregamento de massa, para carregamentos acima de 2500  $\text{g/m}^2$ .

Vários autores investigaram a influência da tensão de destacamento da torta ( $\sigma$ ) com o carregamento da torta ( $\text{g/cm}^2$ ). Normalmente, essa tensão é avaliada para 50% de remoção ( $\sigma_{50}$ ). KOCH (1996) utilizou resultados de vários autores e comparou a dependência da tensão média de destacamento,  $\sigma_{50}$ , com o carregamento de torta,  $W$ , para um feltro de poliéster (flexível), com a limpeza sendo realizada por fluxo de ar reverso. O autor mostrou que a tensão obtida pela limpeza por fluxo de ar reverso decresce fortemente com o aumento do carregamento de torta, e esse decréscimo é brusco para baixos valores de carregamento de torta (abaixo de 500  $\text{g/m}^2$ ). Entretanto, para carregamentos acima de 1000  $\text{g/m}^2$ , a tensão se torna independente do carregamento de torta.

Como pode ser visto, a força de adesão é de fundamental importância na remoção da torta de filtração. Entretanto, não é objetivo deste trabalho a investigação sobre este fator. No entanto, métodos para o cálculo da força de adesão podem ser encontrados na literatura (AGUIAR, 1995; SEVILLE, 1989).

## 2.9 Remoção da torta por blocos

Considerando o caso de um meio filtrante no qual uma torta uniforme foi formada. Um fluxo de ar é imposto na direção oposta ao sentido da filtração, como mostra a Figura 2.11.

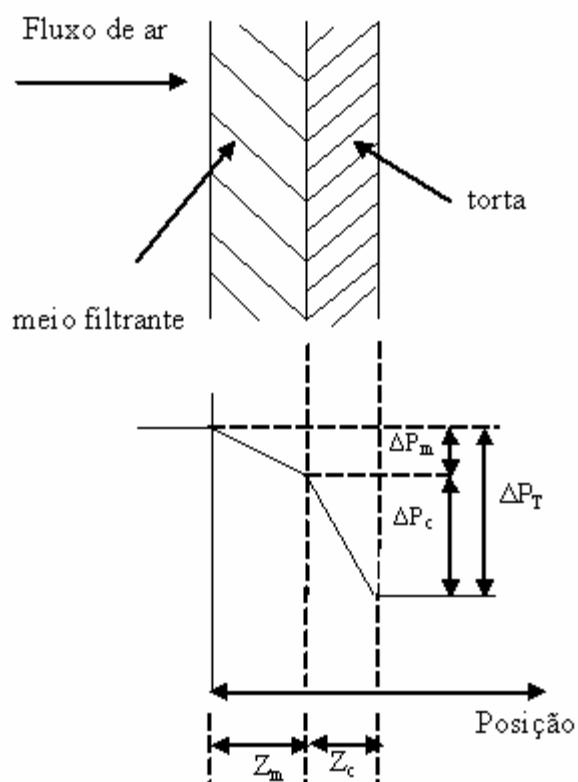


Figura 2.11: Distribuição da pressão no meio filtrante e na torta durante o fluxo reverso. (SEVILLE, 1997).

Quando um fluxo reverso de gás é estabelecido, existirá uma diferença total de pressão através do meio mais torta,  $\Delta P_T$ . Entretanto, somente parte desta diferença de pressão,  $\Delta P_C$ , age através da torta do filtro (KOCH, 1996). Desta maneira, a partir das equações (1) e (2), pode ser obtida a Equação (4):

$$\Delta P_c = \Delta P_T \cdot \frac{K_c \cdot W}{K_c \cdot W + K_m} \quad (4)$$

A Equação (4) fornece a queda de pressão através da torta, e também, como mostrado na Figura 2.11, a força de tensão na interface meio filtrante – torta (SEVILLE, 1997). Desta maneira, esta quantidade é de interesse primário quando se investiga as características de uma determinada combinação meio filtrante – pó.

Durante a limpeza do meio filtrante, o destacamento da torta ocorre, como já citado anteriormente, por blocos, onde algumas áreas são removidas inteiramente e outras não (KOCH, 1996). A Equação (4) foi desenvolvida para uma torta uniforme. No entanto, a equação é igualmente aplicada para um filtro parcialmente limpo (SEVILLE, 1997). Devido a não homogeneidade da resistência do fluxo, um filtro parcialmente limpo mostra regiões de fluxo preferencial do gás, como mostra a Figura 2.12.

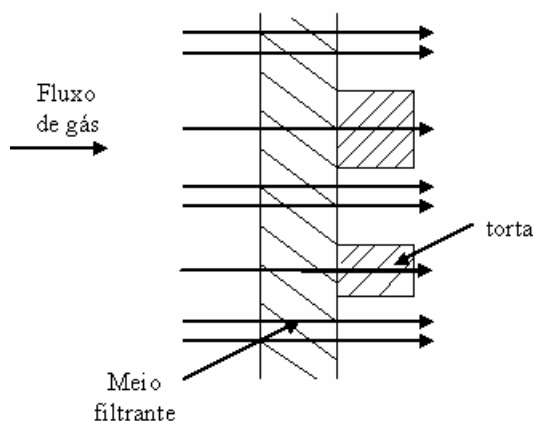


Figura 2.12: Filtro parcialmente regenerado durante a limpeza por fluxo reverso (SEVILLE, 1989; KOCH, 1996; SEVILLE, 1997)



As observações descritas anteriormente para uma torta uniforme se aplicam também para o caso de remoção incompleta da torta, com a condição de que o fluxo através dos pedaços seja retilíneo, ou seja, nas áreas não removidas a velocidade do gás é a mesma no meio e na torta. Esta aproximação é válida contanto que os pedaços de torta não destacados são maiores comparados com a espessura da torta, no qual é, geralmente o caso (SEVILLE, 1997).

## **2.10 Principais estudos sobre a remoção da torta de filtração**

Teoricamente, é de se esperar que a torta de filtração seja totalmente removida, fazendo com que, após a limpeza, o filtro retornasse às suas propriedades iniciais (CALLE, 2002b). Por uma série de razões, que são objetos de investigações independentes, a torta de pó pode não ser removida completamente da superfície do meio filtrante após a etapa de limpeza (DITTLER E KASPER,1999). Esse estado de limpeza, com regeneração incompleta do filtro, é caracterizado por uma perda de carga residual, no qual aumenta com o número de ciclos, tendendo para um valor limite (CALLE, 2002a). Segundo KOCH et al (1996), a queda de pressão residual sobe por um período de tempo durante a operação. Este período, que pode continuar por dezenas ou até mesmo centenas de ciclos de filtração e limpeza, é conhecido como período de condicionamento (*'conditioning period'*). Em casos extremos, o equilíbrio pode não ser estabelecido e a queda de pressão residual pode não alcançar um valor constante. De acordo com DITTLER et al (2002), o condicionamento do filtro reduz a permeabilidade do filtro, causando uma maior perda de carga através da torta após os primeiros ciclos.

Segundo CALLE (2002a), a perda de carga residual está relacionada com as partículas coletadas pelo meio filtrante e que não podem ser limpas. Já de acordo com STOECKLMAYER (1997), citado por CALLE (2002a), a perda de carga residual está ligada à compressão da camada de partículas coletadas no meio filtrante.

DUO et al (1997) mostraram que somente a existência de uma camada residual de pó não explica o aumento observado na perda de carga residual. Este comportamento pode ser atribuído a vários fatores: à limpeza por blocos (*patchy cleaning*), à formação de uma camada residual de pó, à penetração de pó no meio filtrante, ou à combinação de todos estes fatores, dependendo das condições de filtração e limpeza.

Normalmente, a perda de carga residual é utilizada como indicativo do grau de limpeza do filtro. MOREIRA (1998), utilizando como técnica de limpeza a vibração mecânica, constatou que a perda de carga residual não é o melhor parâmetro para certificar se a torta foi realmente removida. O autor observou que a perda de carga residual apresentou variação significativa para remoção de torta entre 0 e 20%. A partir deste valor, a perda de carga residual permaneceu aproximadamente constante, mesmo para altos índices de remoção de torta.

Segundo MAUSCHITZ (2004), a perda de carga residual não fornece nenhuma informação sobre a eficiência do processo de regeneração. Esse autor definiu o chamado fator de rearranjo, que se baseia na separação e reorientação das partículas dentro do meio filtrante. Os parâmetros operacionais foram escolhidos de maneira que nenhuma camada residual de pó permanecesse na superfície do meio filtrante, ou seja, somente foi estudada a reorientação das partículas dentro do meio filtrante, verificando

a influência do fator de rearranjo na eficiência de remoção. O fator de rearranjo foi definido como mostra a Equação (5).

$$\Lambda = \frac{\Delta p_c - \Delta p_m}{\Delta p_c} \quad (5)$$

onde:

$\Lambda$  - fator de rearranjo/ [-]

$\Delta P_m$  - perda de carga residual medida experimentalmente após a regeneração do filtro / [Pa]

$\Delta P_c$  - perda de carga comparativa à igual massa de pó separada durante a formação da torta / [Pa]

Desde que a perda de carga comparativa à massa residual após a limpeza seja maior do que a perda de carga residual, pode ser assumido que as partículas, que estão alojadas dentro do meio filtrante, são rearranjadas, de maneira que resulte numa menor resistência ao fluxo do fluido através do meio filtrante. Os experimentos mostraram que o fator de rearranjo aumentou com massa residual de pó. Além disso, o fator de rearranjo aumentou à medida que a eficiência de regeneração foi melhorada.

Diz-se que um filtro não foi totalmente limpo quando não houve a sua completa regeneração. É conhecido de trabalhos anteriores (SEVILLE et al, 1989; AGUIAR, 1995; KOCH et al, 1996; CALLÉ, 2000; DITTLER, 2002) que vários meios filtrantes mostram o comportamento do chamado “*patchy cleaning*”. A Figura 2.13 mostra uma ilustração do *patchy cleaning*

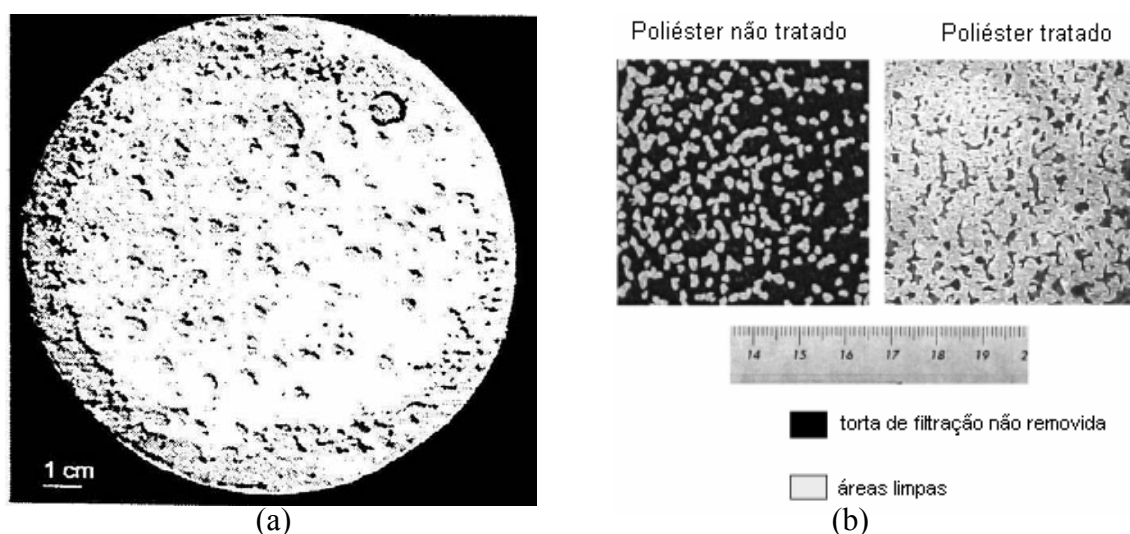


Figura 2.13 : Ilustração do patchy cleaning. (a) Vista superior de um filtro rígido, mostrando em detalhes o “patchy cleaning” (DITTLER e KASPER, 1999) e (b) Filtro de poliéster com e sem superfície de tratamento (CALLÉ,2002b).

Segundo DUO et al (1997a), um importante parâmetro para o *patchy cleaning* é a fração de limpeza,  $f$ , a qual é definida como a razão entre a área limpa do filtro e a área total da superfície do filtro contendo a torta. DITTLER et al (2002) definiu a eficiência de regeneração como sendo a relação entre a massa destacada do meio filtrante e a massa antes da limpeza. Essa eficiência de regeneração pode ser denominada também de fração de limpeza segundo outros autores (DITTLER E KASPER, 1999).

Segundo ELLENBECKER e LEITH (1981), citado por CALLÉ (2002a), para filtros de tecido não trançado, a fração de limpeza decresce com o aumento do número de ciclos de filtração de acordo com a lei de potência. Além disso, poderia ser proporcional ao quadrado da velocidade de limpeza.

CALLÉ (2002a) também apresentou a fração de limpeza como fração de área removida. No entanto, a caracterização pode se dar em termos da fração de massa removida, que é dada como a razão entre a massa removida durante a limpeza e a massa total de pó após a filtração. Além disso, o autor apresentou um modelo simples com a

finalidade de caracterizar a limpeza do meio filtrante. Na construção do modelo, o autor trabalhou com a consideração do fenômeno “*patchy cleaning*”. O modelo é baseado somente nos valores experimentais de perda de carga residual do meio filtrante com o número de ciclos. O ponto principal do estudo foi determinar um padrão de desempenho dos meios filtrantes, sob um número de ciclos, em termos da fração de limpeza e da queda de pressão. Apesar do modelo ter apresentado resultados satisfatórios, este possuiu limitações, como o meio filtrante não levar em conta considerações sobre qualquer tratamento sofrido pelo meio e o fato do modelo ser baseado somente em condições ideais de *patchy cleaning*, o qual está longe da realidade.

Um modelo probabilístico foi desenvolvido por DUO (1997), baseado em várias hipóteses de limpeza, como por exemplo, no fenômeno do *patchy cleaning* com apenas uma fina camada de partículas permanecendo nas áreas limpas. Os resultados mostraram uma boa concordância entre o experimento e a teoria. No entanto, o uso deste modelo é muito complexo.

DITTLER e KASPER (1999) desenvolveram modelos bidimensionais para prever as quedas de pressão como função da eficiência de regeneração e padrões de regeneração. O modelo apresentado era capaz de simular o crescimento da torta de pó e conseqüentemente o comportamento operacional de meios filtrantes parcialmente regenerados. O modelo leva em conta a velocidade local durante a filtração e a espessura do meio filtrante. Entre outras discussões, os autores mostraram que, a forma da curva de filtração é influenciada pelos padrões de regeneração somente no início dos ciclos de filtração e que estes padrões não têm nenhuma influência na forma da curva de perda de carga. A forma das curvas de perda de carga foram afetadas somente pela eficiência global de regeneração. Além disso, as discussões mostraram que quanto

maior o número de áreas regeneradas igualmente distribuídas na superfície, mais baixa a perda de carga residual se torna.

Além de modelos teóricos (DUO, 1997; DITTLER E KASPER, 1999), pouco se conhece sobre o comportamento da regeneração de um filtro, não é claro se a posição das áreas regeneradas na superfície mudam com o passar dos ciclos de filtração e limpeza, ou se o meio filtrante é regenerado sempre na mesma posição. Devido a isto, DITTLER e KASPER (1999) realizaram experimentos de filtração, e com um sistema ótico de medidas, determinaram a frequência local de regeneração. Eles concluíram que algumas áreas tendem a ser regeneradas mais freqüentemente do que outras, e que a torta de pó aumenta nas áreas que não são regeneradas freqüentemente. Se o meio filtrante é regenerado mais freqüentemente em certas posições, a torta nas áreas não regeneradas do meio crescem, e, portanto, a resistência ao fluxo nessas áreas é maior. Logo, os autores concluíram que o comportamento da filtração é bastante influenciado quando não há a completa regeneração do filtro, ou seja, quando ocorre o fenômeno do patchy cleaning.

DITTLER et al (2002) investigaram o comportamento da regeneração e o desempenho operacional de um meio filtrante rígido sob vários ciclos de filtração. O comportamento do filtro foi caracterizado pela eficiência global de regeneração, frequência local de regeneração, e o número e tamanho das áreas regeneradas do filtro. Através de um sistema ótico de medidas foi obtida a distribuição da altura da torta de pó na superfície do meio filtrante para se obter a frequência global de regeneração e a distribuição do tamanho dos pedaços removidos. O tamanho e número dos pedaços removidos foram obtidos através de um programa de análise de imagens. Os resultados mostraram que a eficiência de limpeza se manteve aproximadamente constante com o

número de ciclos. Em relação à distribuição do tamanho dos pedaços removidos, no décimo ciclo de filtração, aproximadamente 86% dos pedaços removidos apresentaram área menor do que  $10 \text{ mm}^2$  ( $0,1 \text{ cm}^2$ ). Em adição a isto, o número de pedaços removidos aumentou com o número de ciclos, tendendo a se tornar constante. A área total de filtração utilizada pelo autor foi de  $176 \text{ cm}^2$ .

RODRIGUES (2004), durante a realização dos seus experimentos, também observou a ocorrência do fenômeno “*patchy cleaning*” nos tecidos de polipropileno e de algodão. Entretanto, essa observação foi apenas qualitativa, onde seu método de análise consistiu em classificar as placas removidas como finas, médias, grossas e muito grossas. Rodrigues observou que havia uma tendência de aumento das placas com o aumento da fração de torta removida, onde a presença das placas maiores ocorreu a partir de 59% de remoção para o tecido de algodão, enquanto que para o polipropileno, as placas grandes foram ocorrer somente a partir de 94% de remoção. Foi concluído também que a incidência de placas finas, ou seja, pedaços de torta pequenos, foi maior para o tecido de algodão do que o polipropileno.

CALLÉ (2001b) observou que com o aumento da quantidade de partículas, maior é a área superficial removida. Em contraste, com o aumento do número de ciclos, a área superficial média de zonas removidas diminuiu.

Como pôde ser observado, além das informações teóricas encontradas na literatura, pouco se conhece sobre o fenômeno da limpeza por blocos. Desta maneira, o trabalho em questão se propõe a estudar quantitativamente o comportamento da remoção da torta de filtração, com o intuito de tentar esclarecer o comportamento da limpeza por blocos que acontece devido à regeneração incompleta do filtro.

### *3. MATERIAIS E MÉTODOS*

#### **3.1 Aspectos gerais do equipamento de filtração**

O equipamento de filtração que foi utilizado durante a realização dos vários experimentos pertence ao laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos e está mostrado na Figura 3.1. O equipamento consiste basicamente de uma caixa de filtração, construída em aço, onde se encontra o meio filtrante (tecido). Em uma das extremidades do filtro, que pode ser denominada de extremidade "suja", é conectado o gerador de pó. Este, por sua vez, está fixo dentro de uma caixa de ferro que funciona como um suporte. Na outra extremidade denominada de "limpa", está conectado um soprador. As partes que integram o equipamento serão detalhadas a seguir.

##### **3.1.1 Caixa de filtração**

É na caixa de filtração que se encontra o meio filtrante, responsável pela captura das partículas de pó contidas no fluxo gasoso. O meio filtrante utilizado consistiu de uma tela plana de tecido de seção retangular, onde este era esticado e parafusado entre duas molduras que eram colocadas no interior da caixa de filtração. O filtro possuía uma área de filtração de 225 cm<sup>2</sup>. A caixa de filtração construída em aço era constituída de duas tampas unidas por uma dobradiça. Entre essas tampas era colocado o meio filtrante. As tampas eram então fechadas e mantidas unidas através de garras que tinham por finalidade fazer com que o filtro permanecesse fixo dentro das tampas. As tampas possuíam revestimento de borracha de modo a permitir a vedação do sistema.



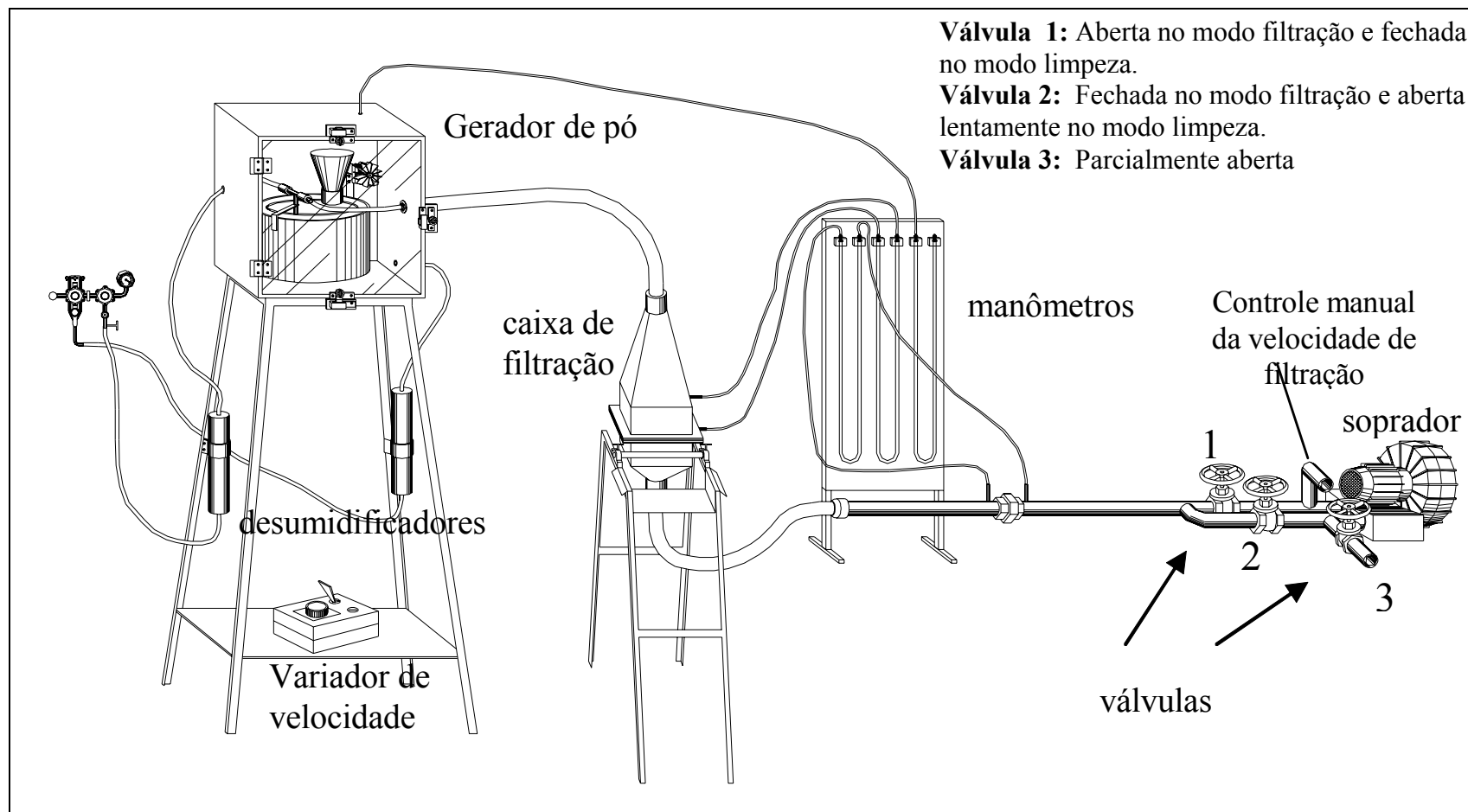


Figura 3.1: Vista geral do equipamento de filtração.

A caixa de filtração era colocada sobre um suporte articulado possibilitando seu posicionamento tanto na vertical, durante a filtração, quanto na horizontal, durante a limpeza, de acordo com a necessidade da operação. Para facilitar a mobilidade, as extremidades da caixa de filtração eram ligadas através de mangueiras flexíveis de 2" de diâmetro. Em uma das extremidades do filtro estava conectado o gerador de pó e na outra o soprador.

Uma foto ilustrativa da caixa de filtração pode ser vista na Figura 3.2.



Figura 3.2: Foto ilustrativa da caixa de filtração.

### **3.1.2 Gerador de Pó**

O alimentador (ou gerador) de pó que foi utilizado era do tipo prato giratório, constituído de um prato de aço inoxidável com 24 cm de diâmetro. Nesse equipamento, foi fixado na parte superior um cone para a alimentação de pó. Uma vez alimentado, o pó era forçado a escoar radialmente pela ação de um nivelador. Em volta deste prato, havia um sulco semicircular, onde o pó tendia a preencher.

Um sugador do tipo Venturi, onde era alimentado o ar comprimido, foi fixado na parede externa do alimentador de pó, que sugava permanentemente o pó, retido dentro do sulco, à medida que o prato girava, alimentando assim, em forma de poeira, a caixa de filtração.

O prato giratório era conectado a um variador de velocidade, de modo a permitir diferentes taxas de alimentação de pó.

Um esquema do alimentador de pó pode ser visualizado na Figura 3.3

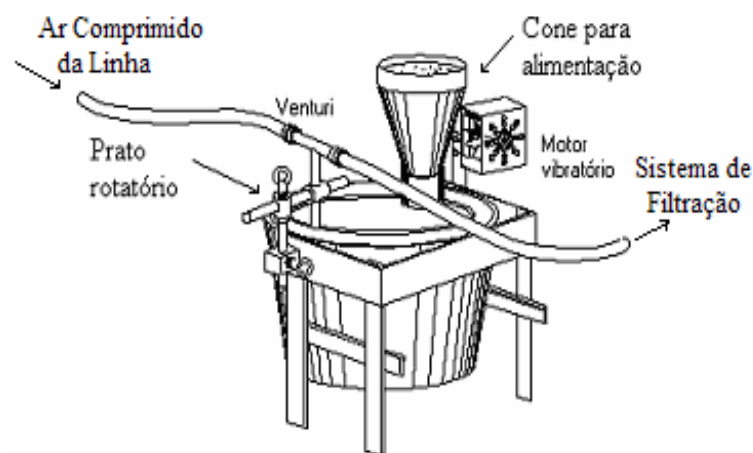


Figura 3.3: Esquema geral do alimentador de pó.

### **3.1.3 Medidores de pressão e de vazão**

Para medir a queda de pressão total no filtro durante a filtração foi utilizado um manômetro diferencial do tipo tubo em U, com água como fluido manométrico. As tomadas de pressão eram realizadas na entrada e na saída do filtro.

A vazão do gás era medida utilizando-se uma placa de orifício, que estava conectada a um manômetro diferencial do tipo tubo em U, também com água como fluido manométrico. Esse medidor foi acoplado na linha entre a saída da caixa de filtração e o soprador.

### **3.1.4 Controle e direcionamento do escoamento do gás**

A sucção do gás contendo o material particulado (modo filtração) e a limpeza do filtro foram feitas por um soprador marca IBRAM com 4 HP de potência. Para direcionar o escoamento do ar foram utilizadas três válvulas tipo gaveta e uma controladora da vazão. Essas válvulas foram úteis para controlar a vazão e reverter o sentido do escoamento do gás, durante a fase de limpeza do filtro. Elas estão numeradas na Figura 3.1 e suas operações serão descritas a seguir.

Durante o processo de filtração, o ar que continha o material particulado era sugado para o filtro. Para isso, a válvula 1 permanecia totalmente aberta, a válvula 2 totalmente fechada, a 3 parcialmente aberta até uma marca pré estipulada, e a válvula controladora de ar era controlada manualmente, de modo a manter constante a velocidade de filtração através de observações na queda de pressão no manômetro em U.

Já na etapa de limpeza do filtro, o escoamento do ar tinha que ser invertido. Para isso, a válvula 1 era fechada totalmente, a válvula 2 aberta lentamente até que o gás atingisse a velocidade superficial de limpeza desejada, a válvula 3 permanecia parcialmente aberta, até uma marca pré estipulada, e a válvula controladora de ar ficava totalmente aberta.

Todos esses procedimentos tiveram que ser realizados de modo a manter um bom controle das velocidades tanto de filtração quanto de limpeza.

### **3.1.5 Controle da umidade**

Em muitos sistemas de filtração, a umidade causa a aglomeração do pó sobre a superfície da manga. Isso faz com que ocorra uma menor passagem de ar,

devido a resistência adicional da torta de pó. Devido a isto, a umidade, durante os ensaios de filtração foi controlada, de forma que não houvessem aglomerações do material particulado no tecido.

De forma a manter a umidade do ar durante a filtração o mais baixo possível, colunas de desumidificação contendo sílica gel foram colocadas na parte externa do equipamento, como mostra a Figura 3.4.

A umidade dentro da caixa de filtração foi mantida entre 8 e 20%. No entanto, em um mesmo experimento, não ocorreram variações na umidade maiores do que 5%, de um ciclo para outro, como pode ser visto no ANEXO B.



Figura 3.4: Vista das colunas contendo sílica gel

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 Material pulverulento

O material pulverulento utilizado durante a pesquisa foi o concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), fornecido pela FOSFÉRTIL S.A. A densidade de partícula foi de  $2,79 \text{ g/cm}^3$ , obtida por picnometria a hélio, através do equipamento ACCUPYC 1330, da Micromeritics. O diâmetro médio volumétrico das partículas foi

de 4,38  $\mu\text{m}$ , obtido através do equipamento MALVERN MASTERSIZER. A curva de distribuição granulométrica cumulativa do material pulverulento está ilustrada na Figura 3.5.

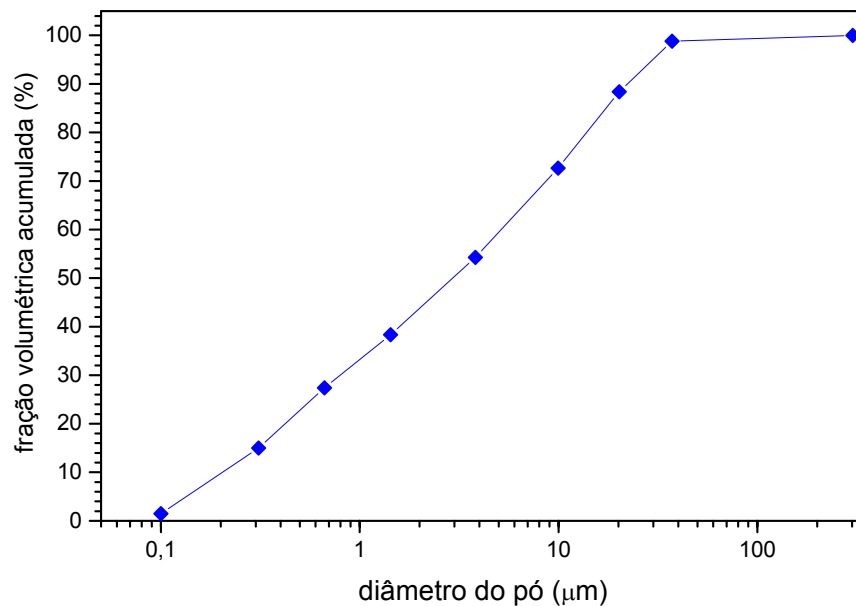


Figura 3.5: Curva de distribuição granulométrica do material pulverulento, construída a partir dos resultados obtidos do programa MALVERN MASTERSIZER.

### 3.2.2 Meio filtrante

O meio filtrante utilizado foi um feltro de poliéster, submetido a tratamento de calandragem e de chamuscagem em uma das faces, tratamento esse que facilita a remoção da torta de filtração. O filtro possui uma gramatura de  $534\text{g/m}^2$  e espessura de 1,5mm, fornecido pela empresa GINO CACCIARI. A Figura 3.6 mostra a imagem da superfície do tecido, gerada através de um microscópio eletrônico de varredura, pertencente ao CCDM, UFSCar.

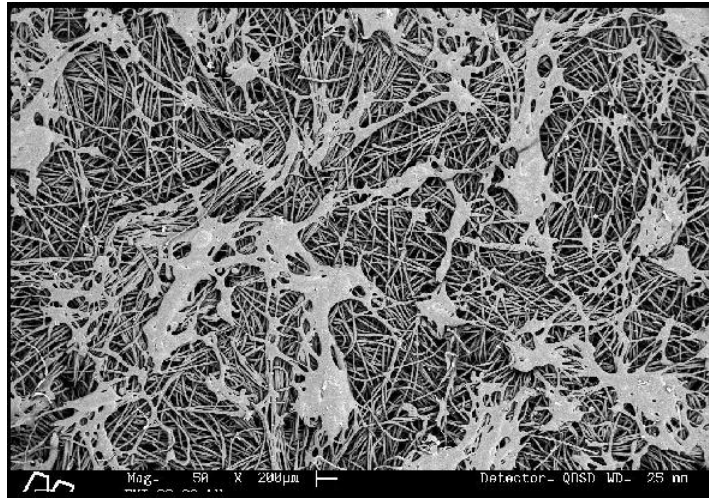


Figura 3.6: Vista da superfície do filtro de poliéster tratado com um aumento de 50 vezes mostrando em detalhe o derretimento das fibras para facilitar a remoção de partículas.

### 3.3 Realização dos ensaios

#### 3.3.1 Ensaio de filtração

Para realizar os ensaios de filtração, era necessário fazer com que o material pulverulento fosse gerado e dispersado no ar de modo que pelo filtro passasse ar sujo. O material pulverulento a ser filtrado foi gerado no alimentador de pó e através de um sugador tipo Venturi era disperso na linha que o levava até a caixa de filtração, a uma vazão de pó constante. Essa vazão de pó era controlada por um variador de velocidade. O ar "sujo" passava através de um filtro, que foi colocado na posição horizontal perpendicular ao escoamento do gás, onde as partículas ficavam retidas na sua superfície, formando a denominada torta de filtração. O ar "limpo" que saía do filtro tinha sua vazão medida por um medidor tipo placa de orifício acoplado a um manômetro de tubo em U. Essa vazão de ar era mantida constante durante toda a operação de filtração, através de ajuste manual da válvula controladora de fluxo. Durante a etapa de filtração, foram realizadas medidas da queda de pressão total no filtro com o tempo e ao final da filtração a massa de pó depositada no tecido era pesada.

Durante a realização dos testes, a velocidade de filtração foi mantida constante e igual a 5 cm/s. A filtração era interrompida assim que a queda de pressão máxima pré-estipulada era atingida. Trabalhou-se com quedas máximas de pressão de aproximadamente 1960 Pa (20 cm H<sub>2</sub>O), 2939 Pa (30 cm H<sub>2</sub>O) e 3919 Pa (40 cm H<sub>2</sub>O). Para as perdas de carga máxima de 1960 Pa, a leitura no manômetro era realizada a cada 20 segundos. Já para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, as leituras eram realizadas a cada 30 segundos. Assim, quando a perda de carga máxima pré-estipulada era alcançada, a filtração era interrompida. Para facilitar a realização dos cálculos, trabalhou-se com tempos exatos de filtração, múltiplos de 20 ou 30, dependendo da perda de carga máxima pré-estipulada. Se a perda de carga máxima fosse atingida em um valor de tempo não múltiplo, a filtração prosseguia até atingir um tempo múltiplo, mesmo que alcançasse um valor maior que a perda de carga máxima pré-estipulada. Devido a isto, as curvas de filtração apresentarão variação no valor máximo de perda de carga máxima.

### **3.3.2 Remoção da torta**

Para se estudar o fenômeno do “*patchy cleaning*”, ou o destacamento da torta em blocos, era necessário remover a torta do tecido. Para isso foi utilizada a técnica de limpeza por fluxo de ar reverso. Neste tipo de técnica, o ar limpo era soprado no sentido inverso ao da filtração.

Assim que a queda de pressão durante a filtração atingia um valor máximo pré-estabelecido, o processo de filtração era interrompido, e o compressor desligado. O conjunto de válvulas que permitia a inversão do fluxo de ar era ajustado e o compressor era novamente ligado. A válvula que permitia o fluxo inverso de ar através do



filtro era aberta lentamente, até que o gás atingisse a velocidade superficial de limpeza desejada, que foi mantida constante durante toda a limpeza do meio filtrante. Este procedimento era necessário para evitar a expulsão da torta devido a uma possível ação mecânica de um pulso de ar.

As velocidades de limpeza utilizadas foram de 5, 10, 13 e 16 cm/s. O tempo de limpeza pré-estabelecido em todos os testes foi de 2 minutos. Este tempo de limpeza foi escolhido, pois durante a realização dos experimentos, percebeu-se que após um minuto de limpeza, não havia mais remoção da torta. Desta maneira, este tempo foi estipulado para garantir que a limpeza não seria interrompida.

Ao término da etapa de limpeza, media-se a massa de pó desprendida do filtro, que era recolhida em um papel e pesada, conforme ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Vista do filtro no momento da remoção da torta de filtração.

Após cada ciclo de filtração e limpeza, era necessário fotografar as tortas parcialmente removidas, de modo a se obter imagens a serem analisadas em um microcomputador através de um programa de análise de imagens, IMAGE PRO PLUS. As fotografias foram obtidas através de uma câmara digital SONY P92. As imagens obtidas eram necessárias para se quantificar a área removida do filtro.

Uma visualização do meio filtrante antes e após a limpeza pode ser vista na

Figura 3.8.

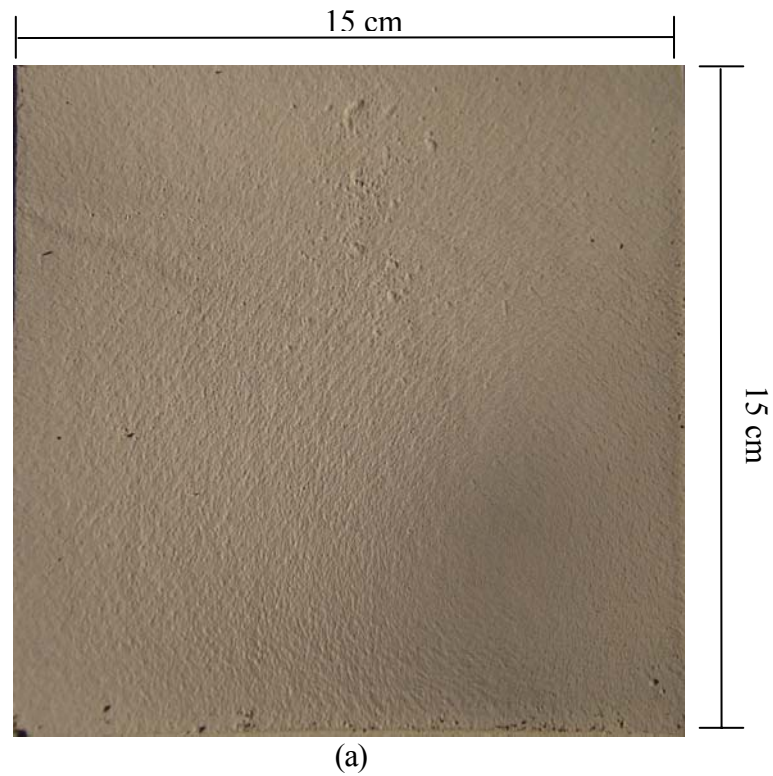


Figura 3.8: (a) Filtro com a torta de filtração após o primeiro ciclo de filtração e (b) filtro parcialmente limpo com velocidade de filtração igual a 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa, mostrando claramente o fenômeno do patchy cleaning.

### 3.3.3 Análise das imagens

As imagens obtidas através de uma câmera digital eram levadas para um programa de análise de imagens, IMAGE PRO PLUS, onde era necessário marcar as áreas onde a torta foi removida. As áreas a serem marcadas tinham que ser obtidas manualmente, pois não havia contraste entre as partes destacadas e a torta que permanecia retida. Desta forma, foram utilizados recursos do próprio programa para realizar a marcação das áreas estipuladas. Além disso, podiam ser marcadas tanto as áreas destacadas do filtro quanto os pedaços de torta que permaneciam no tecido. Como um dos objetivos deste trabalho era obter os tamanhos dos pedaços de torta removidos, optou-se por marcar as áreas removidas do filtro, como pode ser visto na Figura 3.9.

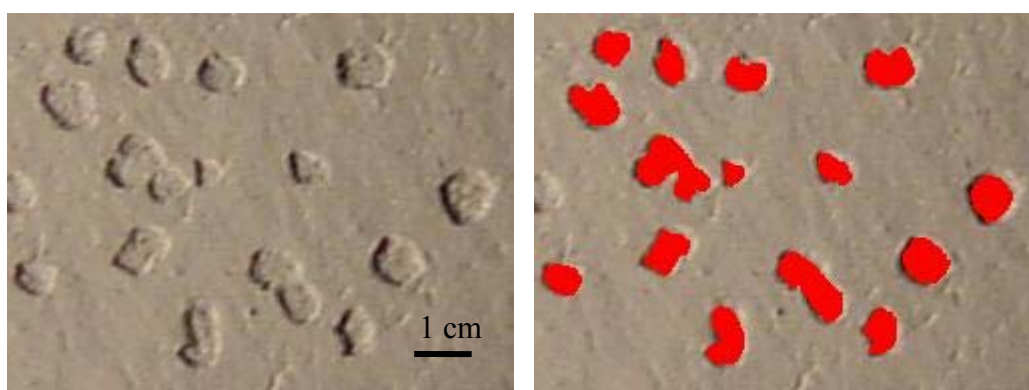


Figura 3.9: (a) Ilustração dos pedaços de torta arrancados na limpeza e (b) áreas marcadas através do Programa de análise de Imagens, dos pedaços de torta arrancados na limpeza.

Essas análises tinham como objetivo fornecer a área limpa do tecido, bem como o tamanho médio dos pedaços de torta removidos. Uma imagem das áreas destacadas do filtro, após terem sido tratadas no analisador de imagens, pode ser vista na Figura 3.11.

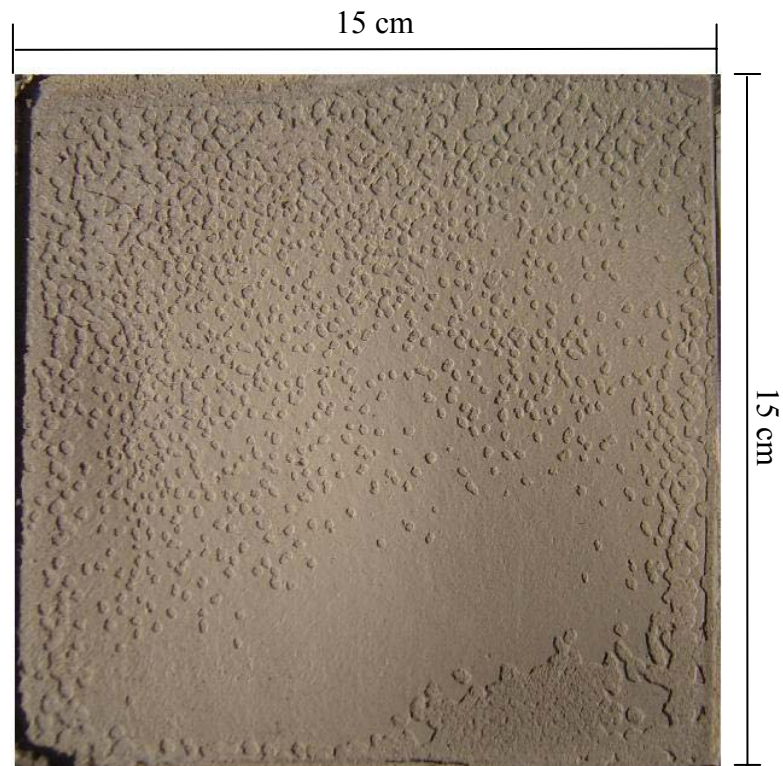


Figura 3.10: Imagem obtida através de uma câmera digital no após a limpeza do 1º ciclo a uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 1919$  Pa.

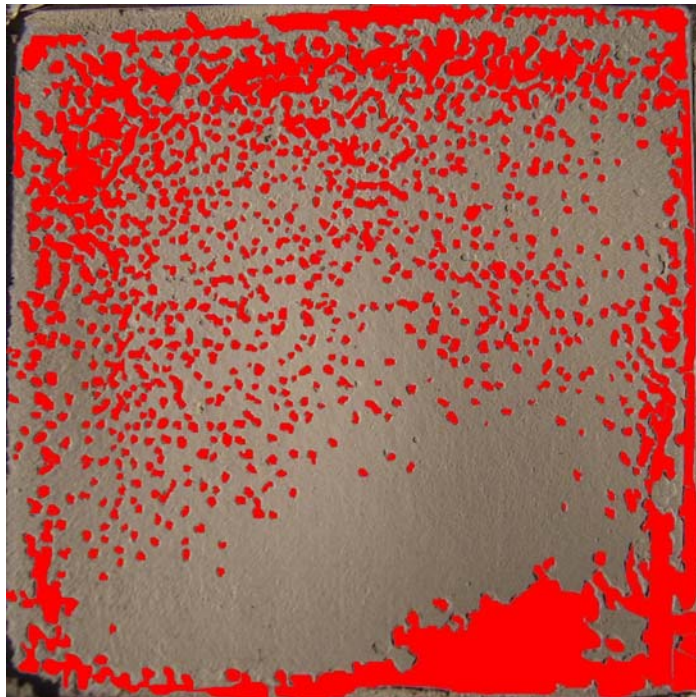


Figura 3.11: Ilustração das áreas destacadas tratadas no programa Image Pro Plus.

Apesar da Figura 3.10 ter apresentado uma boa nitidez para se obter as áreas destacadas, nem todas as fotos tiradas apresentaram o mesmo resultado, devido ao fato de com o passar do número de ciclos, se torna mais complicado definir o que era torta e o que era tecido. Um exemplo do exposto acima pode ser observado nas Figuras 3.12 e 3.13.

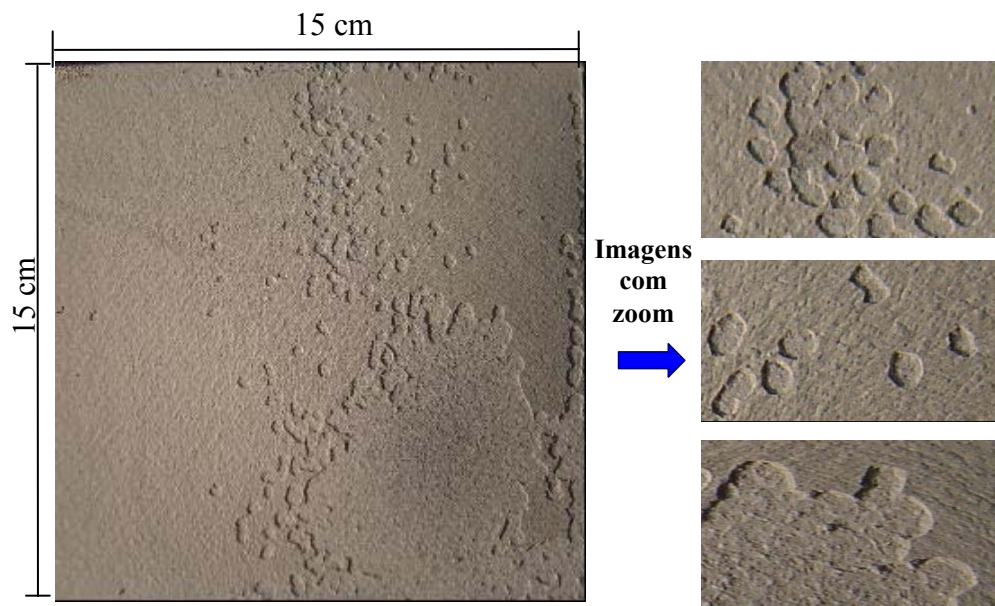


Figura 3.12: Fotografia obtida no 1º ciclo de filtração mostrando em detalhes as áreas removidas.

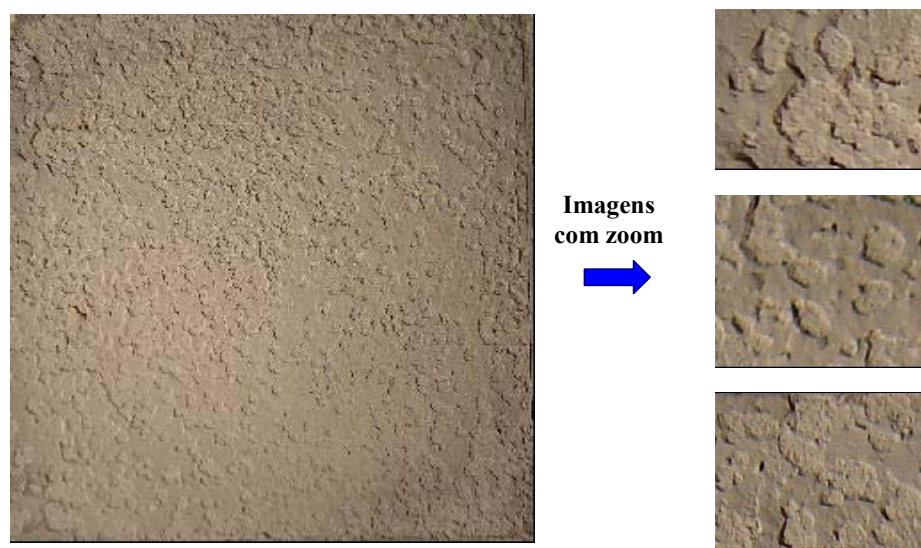


Figura 3.13: Fotografia obtida no 10º ciclo de filtração mostrando em detalhes as áreas removidas.

### 3.3.4 Tratamento dos dados

A partir das imagens tratadas no programa de análise de imagens, ou seja, após as imagens terem tido suas áreas destacadas marcadas, o programa fornecia, após a sua correta calibração, o valor de cada pedaço marcado. Os valores obtidos eram então transportados para a planilha Excel. Como eram obtidos muitos valores de pedaços removidos para cada ciclo, estes valores foram divididos em faixas de tamanhos, onde dentro de cada faixa era calculada a média dos pedaços removidos, como mostra a Tabela 1.

Tabela 3.1: Exemplo da obtenção do tamanho médio dos pedaços removidos

Faixas de tamanho dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	Tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	Número de pedaços removidos
< 0,03	0,015	178
0,03 - 0,05	0,04	108
0,05 - 0,1	0,075	75
0,1 - 0,2	0,15	47
0,2 - 0,5	0,35	18
0,5 - 1,0	0,75	3
1,0 - 2,0	1,5	5
19,93	19,93	1
		435

Deste modo, com a obtenção do tamanho médio dos pedaços removidos, puderam ser obtidas o quanto esses pedaços representam tanto na quantidade total dos pedaços removidos quanto na área total removida. Essas análises são apresentadas no item Resultados e Discussões.

### 3.4 Metodologia utilizada para os cálculos das frações de área e de massa removida e da eficiência de limpeza

Para a determinação da fração de área superficial limpa, foi utilizada a seguinte relação:

$$\text{Fração superficial da área limpa} = \frac{\text{Área da superfície limpa do filtro, em cm}^2}{\text{Área total do filtro, em cm}^2}.$$

Foi admitido, que a área limpa do filtro foi a área que teve sua camada de pó destacada totalmente, exceto para uma fina camada de pó residual, que permaneceu no filtro, conforme ilustrado na Figura 3.14:

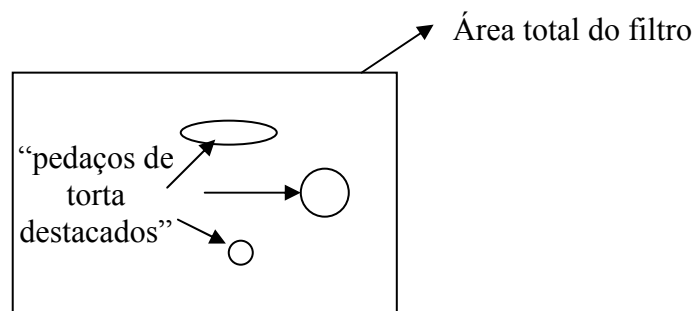


Figura 3.14: Esquema ilustrativo da contagem da área removida

Já para a determinação da fração de massa limpa, a qual foi comparada com a fração de área removida, foi utilizada a seguinte relação:

$$\text{Fração de massa limpa} = \frac{\text{Massa de pó despreendida da torta durante a limpeza, em gramas.}}{\text{Massa total da torta de pó, em gramas.}}$$

A partir da fração de massa limpa, tem-se a eficiência de remoção, que em termos de porcentagem, é dada como segue:

$$\text{Eficiência de remoção} = \text{fração de massa limpa} \times 100 (\%)$$

### **3.5 Variáveis e condições operacionais utilizadas nos ensaios de filtração e remoção da torta.**

A variável que foi investigada durante os ensaios de filtração foi a perda de carga máxima ( $\Delta P_{\text{máx}}$ ) no filtro. Durante o processo de remoção da torta, as variáveis investigadas foram a velocidade superficial de limpeza ( $v_l$ ) e o número de ciclos de limpeza, onde foram realizados dez ciclos de filtração e limpeza. A velocidade de filtração foi mantida constante em todos os experimentos em 5 cm/s.

### 3.6 Resumo dos ensaios realizados

A Tabela 3.2 mostra, em resumo, os ensaios que foram executados durante o período de realização deste projeto. Essa tabela contém uma combinação de diferentes condições experimentais nos ensaios de filtração. Para cada ensaio de filtração foram realizados 10 ciclos de filtração e limpeza. Foram utilizadas quatro diferentes velocidades de limpeza, e três perdas de carga máxima. Todas as combinações feitas foram de extrema importância para se obter um estudo mais detalhado na influência destas variáveis operacionais no processo de remoção da torta e no estudo do *patchy cleaning*.

Tabela 3.2– Resumo dos ensaios experimentais.

Ensaio	Velocidade de filtração (cm/s)	Velocidade de limpeza (cm/s)	$\Delta P_{\text{máx}}$ (Pa)	Número de ciclos de filtração
1	5	5	1960	10
2			2939	10
3			3919	10
4		10	1960	10
5			2939	10
6			3919	10
7		13	1960	10
8			2939	10
9			3919	10
10		16	1960	10
11			2939	10
12			3919	10
Total: 120 ciclos de filtração				



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, será apresentada uma análise do desempenho dos ensaios de filtração e da regeneração do meio filtrante nos diversos experimentos realizados. Essa análise tem como objetivo mostrar a influência das variáveis operacionais, perda de carga máxima e velocidade de limpeza, na remoção da torta de filtração. Também, serão discutidos resultados acerca do condicionamento do filtro. Partindo-se para objetivos mais específicos do trabalho, serão realizadas análises sobre a influência das condições operacionais no tamanho dos pedaços removidos, bem como na área total removida. Por fim, uma comparação entre as frações de área e de massa removida será realizada, com a finalidade de mostrar a eficiência do método proposto.

### 4.1 Comportamento da filtração e da regeneração do filtro, com a perda de carga máxima, para diferentes velocidades de limpeza.

Para verificar o desempenho dos ensaios de filtração, curvas de perda de carga (Pa) em função da carga mássica por unidade de área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) foram construídas, como mostra a Figura 4.1.

Preferiu-se construir curvas de perda de carga em função da carga mássica, porque eventuais variações na concentração de pó foram inevitáveis devido à dificuldade de se operar o equipamento e controlar todas as condições operacionais.

A Figura 4.1 mostra o comportamento da perda de carga em função da carga mássica, para dez ciclos de filtração e limpeza. Os experimentos foram realizados para a velocidade de filtração de 5 cm/s e para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, variando-se as espessuras finais da torta de filtração, que foram obtidas para as perdas de carga máxima de aproximadamente 1960, 2939 e 3919 Pa.

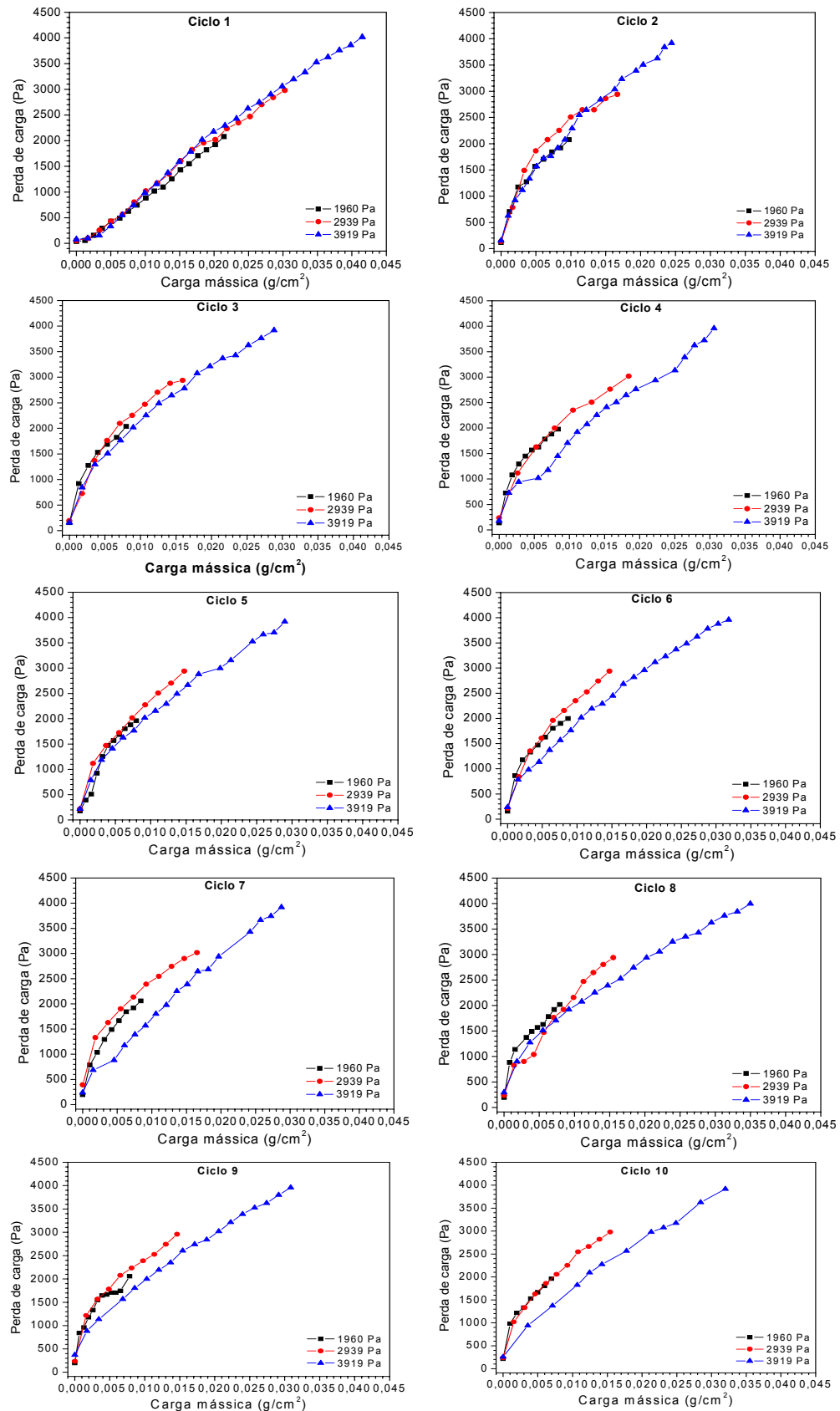


Figura 4.1: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 13 cm/s, para as perdas de carga máximas de 1960, 2939 e 3919 Pa.

Verifica-se que, no primeiro ciclo, a filtração inicial, ou seja, a fase da penetração das partículas aconteceu de forma relativamente rápida, seguida de um aumento linear da perda de carga com o carregamento de massa. A curva mudou substancialmente após a primeira regeneração, ou seja, a partir do segundo ciclo, devido ao fenômeno da limpeza por blocos, mostrando um comportamento convexo em relação à filtração do primeiro ciclo com comportamento linear.

Outra observação foi em relação às diferenças observadas nas curvas, de uma espessura para outra, nos dez ciclos apresentados. Este comportamento se deve ao fenômeno da limpeza por blocos, pois em cada espessura de torta houve um comportamento distinto da remoção da torta, em relação à área removida. Além disso, as características do filtro mudam de um ciclo para outro.

Observações semelhantes podem ser vistas para os ensaios com velocidades de limpeza de 5, 10 e 16 cm/s, que se encontram nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente.

Uma análise necessária a ser feita nos gráficos apresentados nas Figuras 4.1 a 4.4 é em relação à variação da massa coletada por unidade de área, com o número de ciclos, para as diferentes espessuras de torta. Observou-se nessas curvas que houve uma tendência geral já estabelecida (CALLÉ, 2002), no qual a perda de carga aumentou com o carregamento de massa, independente do ciclo apresentado. Outra constatação foi que a massa de torta necessária para alcançar uma certa queda de pressão foi decrescente com o número de ciclos, tendendo a se tornar constante.

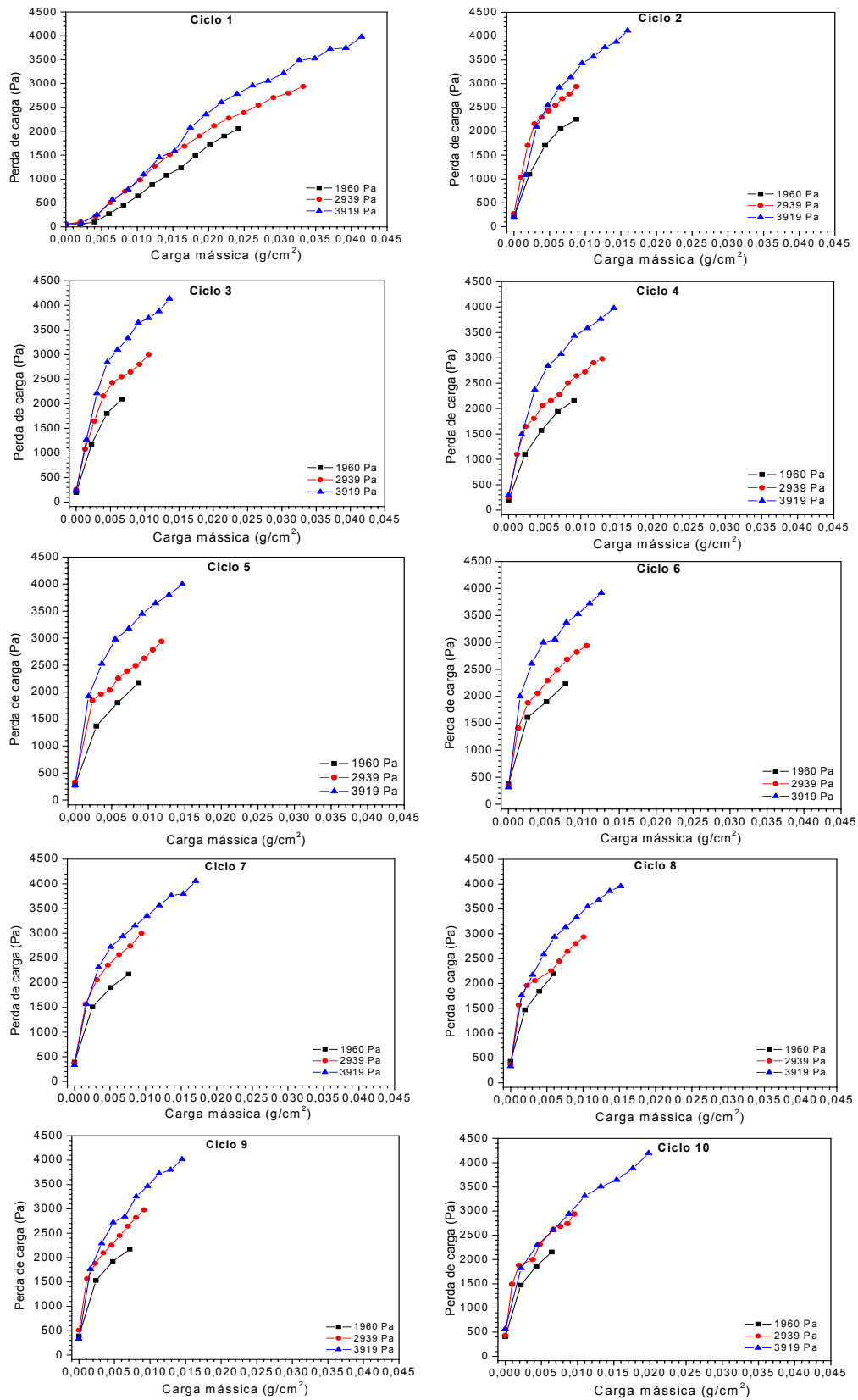


Figura 4.2: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 5 cm/s, para as perdas de carga máximas de 1960, 2939 e 3919 Pa.

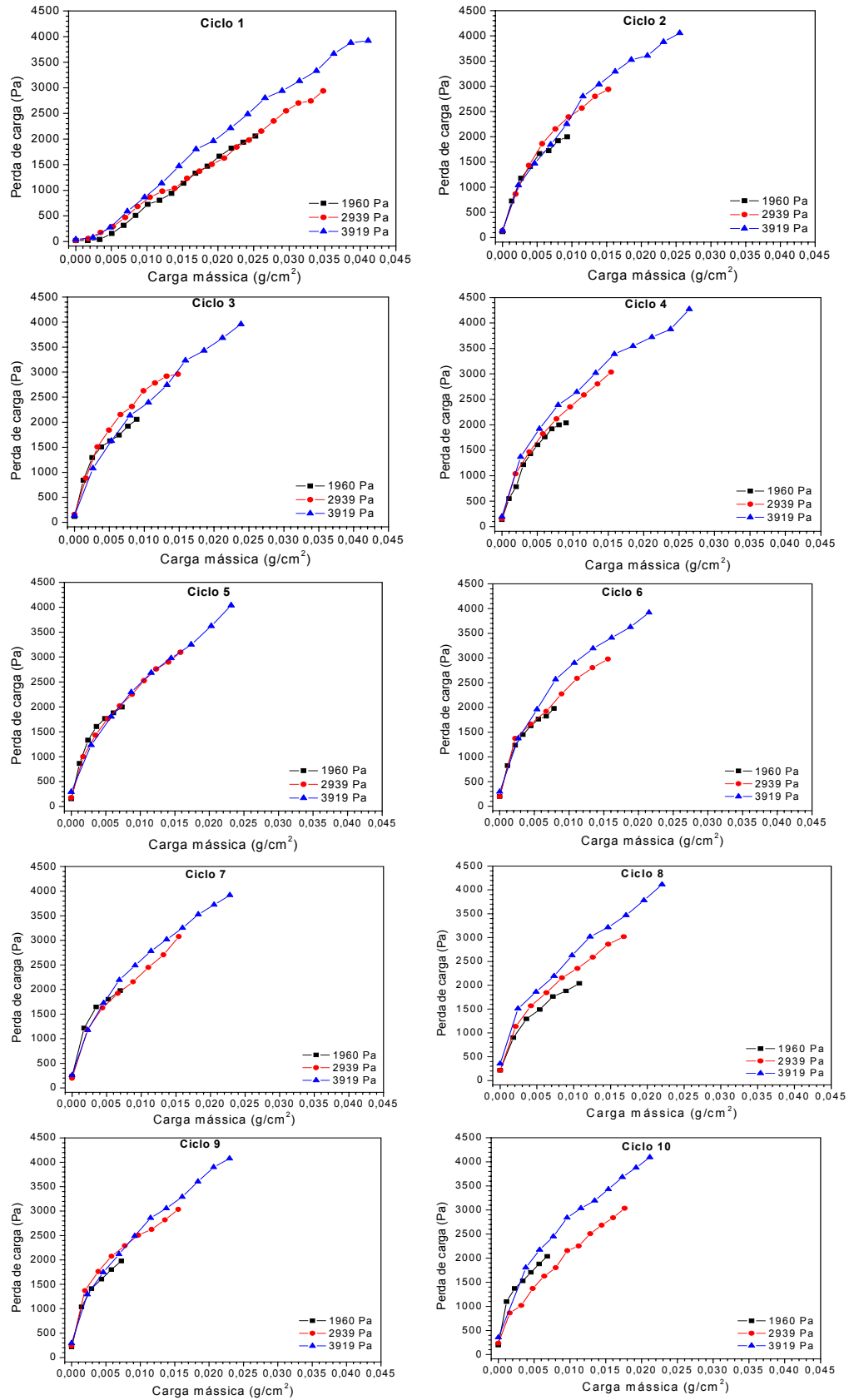


Figura 4.3: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 10 cm/s, para as perdas de carga máximas de 1960, 2939 e 3919 Pa.

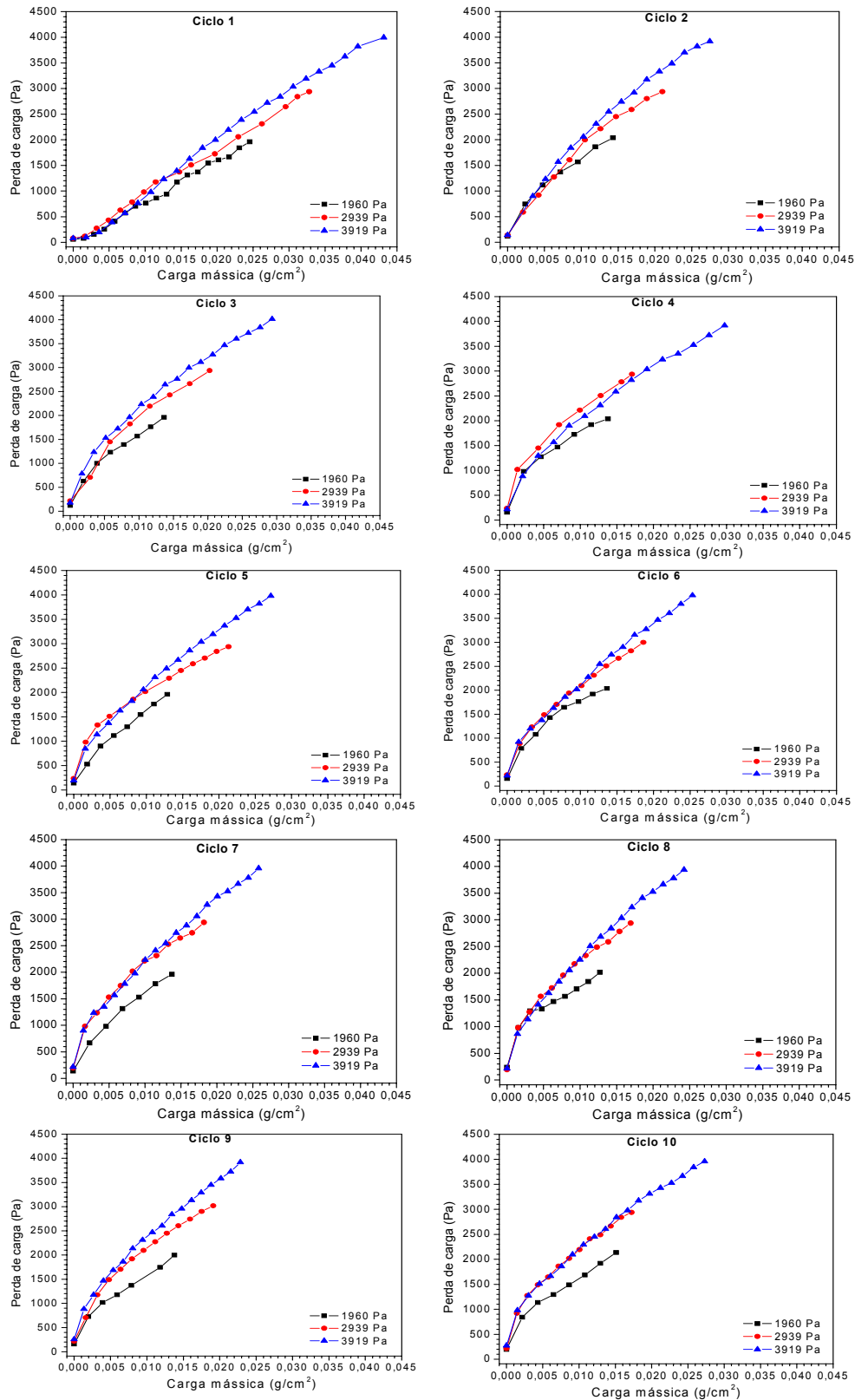


Figura 4.4: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 16 cm/s, para as perdas de carga máximas de 1960, 2939 e 3919 Pa.

Por meio da Figura 4.1 pôde-se perceber que a massa coletada por unidade de área foi de  $0,041 \text{ g/cm}^2$  ao fim do primeiro ciclo, para a torta de maior espessura ( $\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$ ), e decresceu para  $0,026 \text{ g/cm}^2$  no segundo ciclo, permanecendo constante em torno de  $0,030 \text{ g/cm}^2$  a partir do quarto ciclo, até chegar ao décimo ciclo de filtração. O mesmo comportamento da carga mássica, que foi apresentado para a torta de maior espessura, também pôde ser visto para as demais espessuras (com  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$  e  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$ ) investigadas nesse estudo. Para a torta de menor espessura ( $\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$ ), a carga mássica atingiu um valor de  $0,021 \text{ g/cm}^2$  no primeiro ciclo, e após o segundo ciclo, teve seu valor em torno de  $0,009 \text{ g/cm}^2$ , que permaneceu até o décimo ciclo. Já para a torta de espessura média (referente à  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$ ), a carga mássica foi de  $0,030 \text{ g/cm}^2$  no primeiro ciclo e  $0,017 \text{ g/cm}^2$  no segundo ciclo. No terceiro ciclo, o valor da massa diminuiu para  $0,015 \text{ g/cm}^2$  e a partir do quarto ciclo de filtração, o valor da carga mássica permaneceu aproximadamente constante neste valor até o décimo ciclo. Com isso, constatou -se que para a velocidade de  $13 \text{ cm/s}$ , a massa coletada por unidade de área se tornou constante a partir do segundo ciclo de filtração para a torta de espessura fina, e para a torta de espessura média e grossa, a massa se tornou constante a partir do quarto ciclo de filtração.

Este comportamento de decréscimo da massa com o número de ciclos, descrito anteriormente, pode ser explicado como segue: durante o primeiro ciclo de filtração, as primeiras partículas que chegam para serem coletadas, penetram na superfície do filtro e são capturadas no meio filtrante (neste caso as fibras). Então, uma camada de “torta” começa a se formar e as partículas subseqüentes são coletadas na superfície da camada de pó depositada anteriormente, ou seja, da própria torta. Quando

o filtro é limpo, por fluxo de ar reverso, uma fina camada residual de torta permanece na superfície do filtro, ou até mesmo pedaços de torta que permanecem intactos, dependendo da perda de carga máxima pré-estabelecida. Isso porque, como foi visto no capítulo 2, a limpeza ocorre por eliminação de pedaços de torta. Essa quantidade de pó que permanece na superfície do filtro é adicionada ao próximo ciclo de filtração. Começando um novo ciclo de filtração, algumas partículas podem novamente penetrar no meio filtrante. Desta maneira, a queda de pressão no tecido com as novas partículas que chegam no meio filtrante aumenta e, conseqüentemente, menos massa é requerida para alcançar a perda de carga máxima pré-estipulada. No caso apresentado através da Figura 4.1, para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, provavelmente já não houve mais filtração interna, e toda a filtração foi realizada somente pela torta. Conclusões semelhantes às obtidas para a velocidade de limpeza de 13 cm/s podem ser vistas também para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 16 cm/s, encontradas nas Figuras 4.2 a 4.4.

Além dos resultados da massa coletada por unidade de área, serão realizadas análises acerca das massas retida e removida. Como pôde ser observado no ANEXO D, tanto a massa retida quanto a massa removida apresentaram comportamentos aproximadamente constantes com o número de ciclos. Logo, calculou-se a média dos valores dos dez ciclos de filtração. A partir destes valores, construiu-se curvas da variação das massas retida e removida, com a perda de carga máxima, para as diferentes velocidades de limpeza avaliadas no presente trabalho, como mostram as Figuras 4.5 e 4.6.



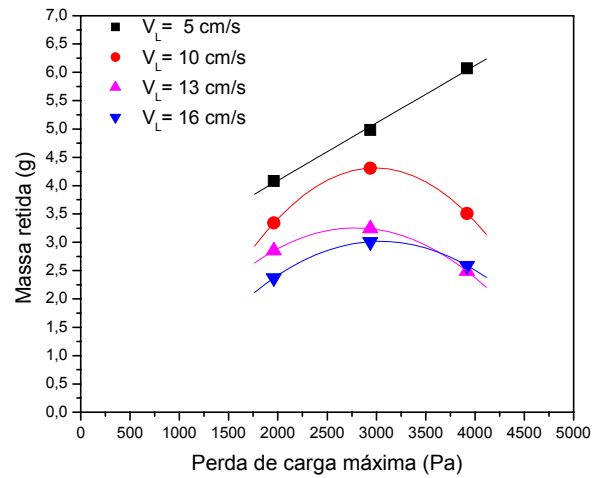


Figura 4.5: Variação da massa retida, com a perda de carga máxima, para diferentes valores de velocidade de limpeza.

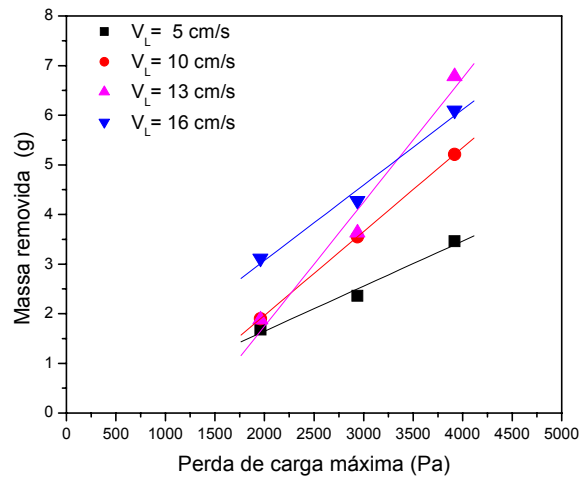


Figura 4.6: Variação da massa removida, com a perda de carga máxima, para diferentes valores de velocidade de limpeza.

Através das curvas apresentadas na Figura 4.5, observa-se que, para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, a espessura da torta foi importante, pois quanto maior a espessura da torta, maior foi o valor da massa retida, ocorrendo um aumento linear da massa retida com a perda de carga máxima. À medida que a velocidade de limpeza aumentou, a massa retida aumentou somente quando se passou de uma perda de carga de 1960 para 2939 Pa, voltando a diminuir para a perda de carga máxima de 3919 Pa. Além disso, com o aumento da velocidade de limpeza, houve uma menor variação de massa retida com o aumento da espessura da torta, que pode ser melhor entendido pelas

tendências das curvas. Pode ser que se fossem utilizados maiores valores de velocidades de limpeza, a massa retida atingiria, num certo valor de velocidade de limpeza, um comportamento constante com a perda de carga máxima. No entanto, mais investigações deveriam ser realizadas para se confirmar tal suposição.

Já a massa removida, como pode ser observado na Figura 4.6, apresentou um comportamento linear com a perda de carga máxima, indiferente da velocidade de limpeza utilizada. Outra constatação foi que, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, praticamente não houve variação da massa removida para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 13 cm/s. Somente para uma velocidade de limpeza de 16 cm/s foi que houve uma variação significativa da massa removida. Os valores das massas removidas, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa foram de 1,68, 1,90, 1,88 e 3,12g para as velocidades de limpeza de 5, 10, 13 e 16 cm/s, respectivamente. Com o aumento da perda de carga máxima, os valores das massas removidas tenderam a aumentar a variação de massa entre as velocidades de limpeza. Uma observação que deve ser feita, é em relação a perda de carga máxima de 3919 Pa, onde, para uma velocidade de limpeza de 13 cm/s, o valor da massa removida foi maior comparado com o valor da massa removida referente a velocidade de limpeza de 16 cm/s. No entanto, esse comportamento será confirmado mais adiante.

A partir dos resultados de massa removida, construiu-se curvas de eficiência de limpeza, com a perda de carga máxima, como mostra a Figura 4.7. A eficiência de limpeza é dada como a razão entre a massa removida e a massa total de pó após a filtração. Da mesma forma como foi feito para as massas retida e removida, também foi calculado, para a eficiência de limpeza, a média dos valores dos dez ciclos.

Os resultados da Figura 4.7 mostram a eficiência de limpeza em termos de porcentagem de remoção.

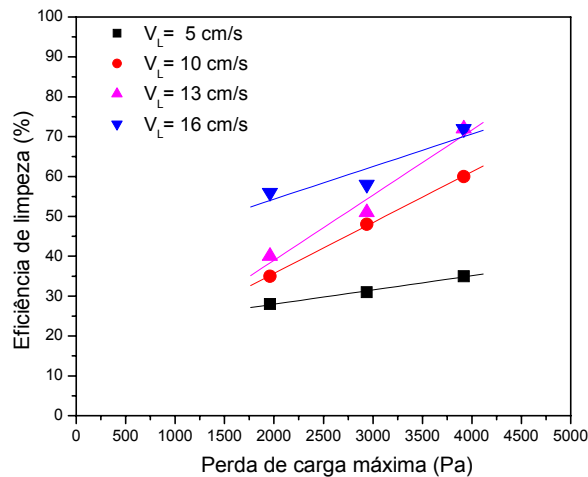


Figura 4.7: Variação da eficiência de limpeza com a perda de carga máxima, para as velocidades de limpeza de 5,10,13 e 16 cm/s.

Através das curvas de eficiência de limpeza apresentadas na Figura 4.7, é possível verificar com mais clareza o comportamento da limpeza do tecido, com a perda de carga máxima, para as quatro diferentes velocidades de limpeza aqui investigadas. Observou-se que a eficiência média de limpeza, para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, variou entre 28% para a torta mais fina ( $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa), entre 31% para a torta de espessura intermediária ( $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa) e 35% para a torta mais grossa ( $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa). Portanto, não existiu uma variação significativa na eficiência de remoção com o aumento da espessura da torta. Desta maneira, para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, não é necessário estipular altos valores de perda de carga máxima, já que não serão alcançadas altas eficiências de limpeza, e, conseqüentemente, pode-se evitar gastos com energia, pois altas perdas de carga requerem alta quantidade de energia.

Para a velocidade de limpeza de 10 cm/s, nota-se também na Figura 4.7, que a eficiência de limpeza variou entre 35% para a torta de menor espessura, entre 48% para a torta de espessura intermediária e entre 60% para a torta de espessura mais

grossa. Nessa condição experimental, houve uma maior variação na remoção, entre 10 e 15%, com o aumento da espessura da torta.

Ainda na Figura 4.7, para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, a eficiência de limpeza variou entre 40%, para a torta de menor espessura, entre 51% para a torta de espessura intermediária, e entre 72% para a torta de maior espessura. Aqui, a variação da eficiência de remoção foi ainda maior, de 10 a 20%, com o aumento da espessura da torta.

Finalmente, para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, a eficiência de limpeza foi em torno de 57% para a espessura de torta com perda de carga máxima de 1960 e 2939 Pa, não havendo variação na eficiência de remoção com o aumento da espessura da torta de filtração. Já para a torta mais grossa, a eficiência de limpeza ficou em torno de 72%.

Portanto, através da Figura 4.7, à medida que se aumentou a velocidade de limpeza, até a velocidade de limpeza de 13cm/s, o comportamento da curva de eficiência de limpeza se tornou mais brusco com o aumento da perda de carga máxima. Isto se deve ao fato de que, para tortas mais grossas, a limpeza é mais fácil comparada com tortas de menores espessuras (SEVILLE, 1989), e essa limpeza tende a melhorar com o aumento da velocidade de limpeza. Entretanto, esse comportamento aconteceu até um certo valor de velocidade de limpeza, que neste caso, foi de 13 cm/s. A partir desta velocidade, o aumento da eficiência de limpeza só aconteceu quando se aumentou o valor da perda de carga máxima de 2939 para 3919 Pa.

## **4.2 Comportamento da filtração e regeneração do filtro, com a velocidade de limpeza, para diferentes perdas de carga máxima.**

Além das análises apresentadas no item 4.1, sobre a influência da perda de carga máxima na remoção da torta de filtração, também podem ser feitas análises sobre a influência da velocidade de limpeza. A Figura 4.8 mostra o comportamento da perda de carga (Pa) em função da carga mássica por unidade de área ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ), para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidades de limpeza de 5,10,13 e 16 cm/s.

Pode-se verificar através da Figura 4.8, que no primeiro ciclo, a massa filtrada necessária para alcançar a perda de carga máxima de 1960 Pa foi aproximadamente a mesma em todas as corridas. As diferenças das velocidades de limpeza só poderão ser vistas a partir do segundo ciclo, onde elas começam a ser aplicadas. Nota-se então, que para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, o valor da massa filtrada foi maior, em torno de  $0,014 \text{ g}/\text{cm}^2$ , enquanto que para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 13 cm/s, o valor da massa filtrada permaneceu em torno de  $0,07 \text{ g}/\text{cm}^2$ . Este comportamento pode ser visto pela proximidade das curvas relativas às velocidades de limpeza de 5, 10 e 13 cm/s e o distanciamento da curva da velocidade de limpeza de 16 cm/s. Isto significa, como era esperado, que a limpeza foi mais eficiente para a velocidade de 16 cm/s, sendo que para as demais velocidades, os valores das eficiências ficaram mais próximos entre si.

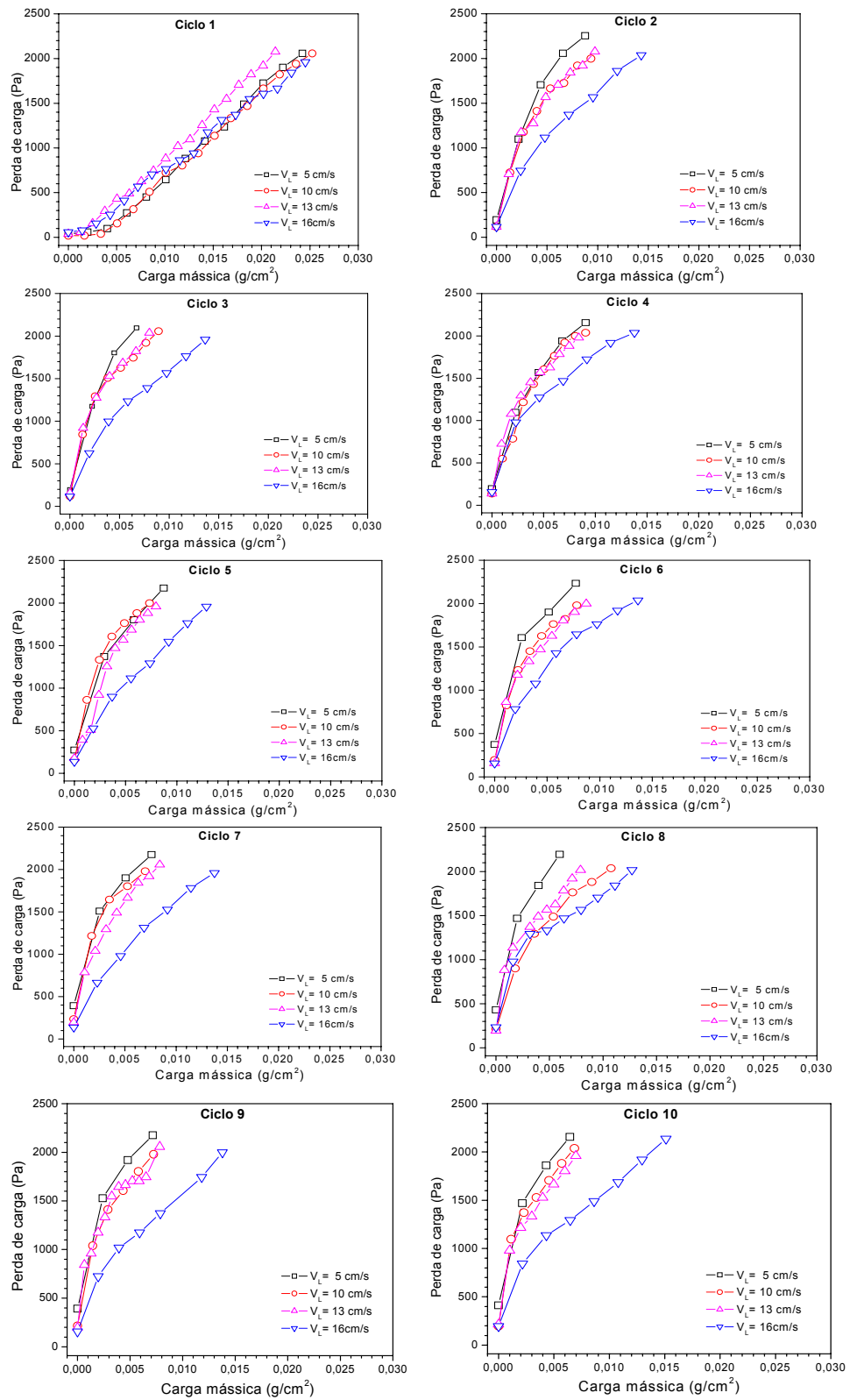


Figura 4.8: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.

Da mesma maneira como foram feitas análises para a perda de carga máxima de 1960 Pa, análises semelhantes foram realizadas para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa. O desempenho das curvas de filtração para uma perda de carga máxima de 2939 Pa pode ser visto na Figura 4. 9.

Através da análise dos resultados apresentados na Figura 4.9, verifica-se que houve uma tendência das curvas apresentarem valores bem próximos para as velocidades de limpeza de 10 e 13 cm/s. Notou-se que só a curva da velocidade de limpeza de 5 cm/s ficou distante das demais, pois foi a que proporcionou a menor eficiência na remoção.

Por fim, para a perda de carga máxima de 3919 Pa, pode-se observar, através da Figura 4.10, que um aumento da perda de carga máxima, de 2939 para 3919 Pa, provocou um maior distanciamento da curva da velocidade de limpeza de 5 cm/s das demais.

Outra constatação foi em relação a curva referente à velocidade de limpeza de 13 cm/s. O fato da curva de filtração referente à velocidade de limpeza de 13 cm/s ter apresentado o comportamento mostrado na Figura 4.9, é que na velocidade de limpeza de 13 cm/s, houve maior remoção da torta de filtração, o que naturalmente fez com que fosse necessária uma maior quantidade de massa para se alcançar o valor da perda de carga máxima, conseqüentemente, resultando em ciclos mais longos.

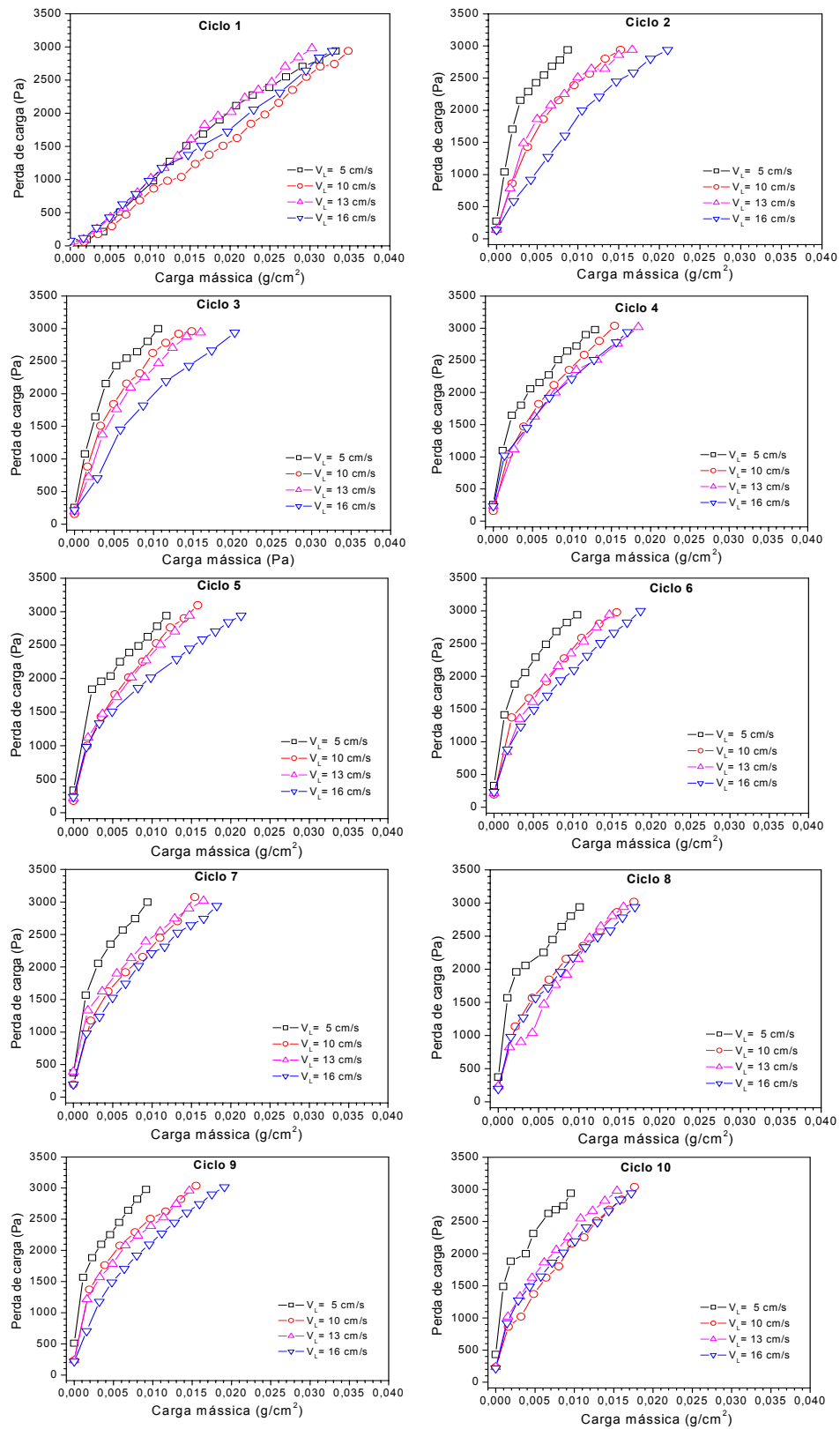


Figura 4.9: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 2939 Pa.



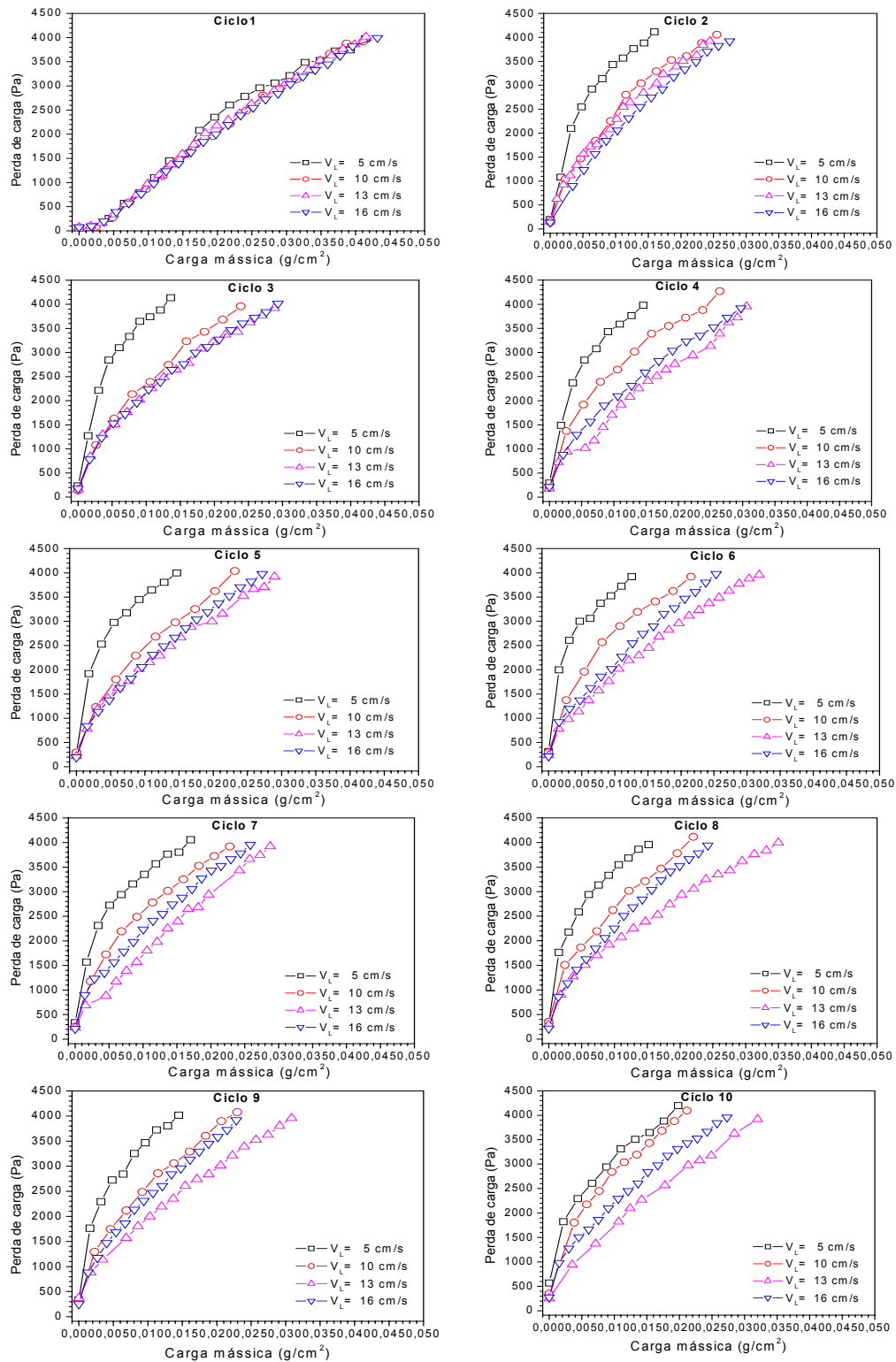


Figura 4.10: Ciclos de filtração com uma velocidade superficial de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3919 Pa.

Para justificar os comportamentos das curvas apresentadas nas Figuras 4.8 a 4.10, curvas de eficiência de limpeza em função da velocidade de limpeza, para diferentes perdas de carga máxima foram construídas, como mostra a Figura 4.11.

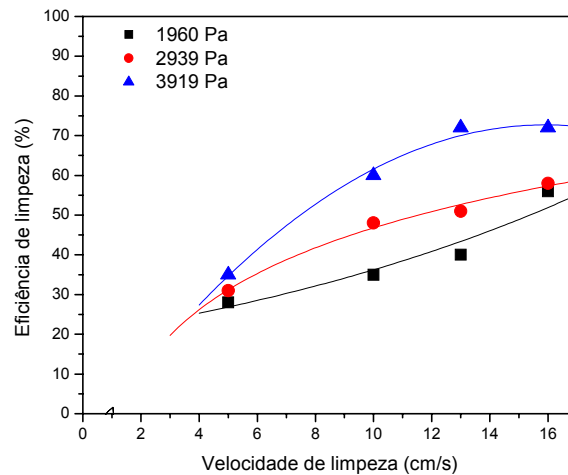


Figura 4.11: Variação da eficiência de limpeza, com a velocidade de limpeza, para diferentes espessuras de torta.

Como pode ser visto através da Figura 4.11, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, a mudança na eficiência de limpeza é mais significativa para altos valores da velocidade de limpeza, pois a eficiência de limpeza permaneceu em torno de 28% para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, 35 % para a velocidade de 10 cm/s, 40% para a velocidade de 13 cm/s e para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, a eficiência de limpeza se mantém em torno de 56%. Estes valores mostram maior eficiência de limpeza para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, na remoção de uma torta de filtração com perda de carga máxima de 1960 Pa. Isto justifica o distanciamento da curva referente à velocidade de limpeza de 16 cm/s em relação às demais velocidades de limpeza, apresentado na Figura 4.8.

Novamente através da Figura 4.11, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa, a maior diferença na eficiência de limpeza foi quando se passou da velocidade de limpeza de 5 cm/s para a velocidade de limpeza de 10 cm/s. Ou seja, enquanto que a

eficiência média de limpeza para a velocidade de 5 cm/s foi em torno de 31%, para as velocidades de 10,13 e 16 cm/s, a variação foi bem menor, sendo as eficiências de limpeza aproximadamente 48%, 51% e 58%, respectivamente. Logo, aumentando-se perda de carga máxima, ou seja, passando de 1960 Pa para 2939 Pa, o aumento na eficiência de limpeza foi mais significativo para baixas velocidades de limpeza, sendo que para valores de velocidade de limpeza entre 10 e 16 cm/s, o aumento da velocidade de limpeza ficou em aproximadamente 10%. A exemplo da perda de carga máxima de 1960 Pa, o gráfico de eficiência de limpeza explica o comportamento das curvas de filtração apresentadas na Figura 4.9.

Por fim, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa, as eficiências de limpeza apresentam um valor médio de 35, 60, 72 e 72% de remoção para as velocidades de limpeza de 5,10,13 e 16 cm/s, respectivamente. Aqui mostra-se claramente que, para a maior espessura de torta de filtração, o aumento da velocidade de limpeza, de 13 cm/s para 16 cm/s, não melhora a eficiência de limpeza, fazendo com que só haja o desgaste das fibras do tecido.

O fato da eficiência de remoção da torta não aumentar com o aumento da perda de carga máxima, a partir de um certo valor de velocidade de limpeza, pôde ser melhor comprovado pela Figura 4.11. Nessa Figura observou-se que existiu um valor limite de velocidade de limpeza, que depende da espessura da torta. Para a perda de carga máxima de 1960 Pa, poderia ser que, para velocidades de limpeza acima de 16 cm/s, a remoção fosse maior. Para uma perda de carga máxima de 2939 Pa, a eficiência de limpeza apresentou tendência de se tornar constante a partir de uma velocidade de limpeza de 13 cm/s. Já para a perda de carga máxima 3919 Pa (torta de maior

espessura), a curva mostrou que a partir da velocidade de limpeza de 13 cm/s não houve remoção adicional da torta, com o aumento da velocidade de limpeza.

Ainda na Figura 4.11, se for fixado, por exemplo, uma porcentagem de 50% de torta removida, será necessário aplicar uma velocidade de limpeza de 15,5 cm/s para remover a torta de menor espessura ( $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa), uma velocidade de 12 cm/s para remover a torta de espessura intermediária (com  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa) e, finalmente, uma velocidade de 7,5 cm/s para a torta de maior espessura (com  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa). Esta discussão só vem a confirmar os resultados apresentados por SIEVERT e LOEFFLER (1987), que mostra que a remoção é mais fácil para tortas de maior espessura, necessitando menores velocidades de limpeza.

### **4.3 Condicionamento do filtro**

Como mostrado no item 2.10, o meio filtrante passa por um período de condicionamento, ou seja, a queda de pressão residual aumenta, por um período de tempo, durante os ciclos de filtração, até atingir um valor constante.

Para mostrar o comportamento do condicionamento do filtro de poliéster, curvas de perda de carga residual, em função do número de ciclos, foram construídas para as diversas combinações das condições experimentais estipuladas no item 3.6.

A Figura 4.12 mostra o comportamento da perda de carga residual e da massa retida com o número de ciclos, para valores de velocidades de limpeza de 5, 10, 13 e 16 cm/s, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa.

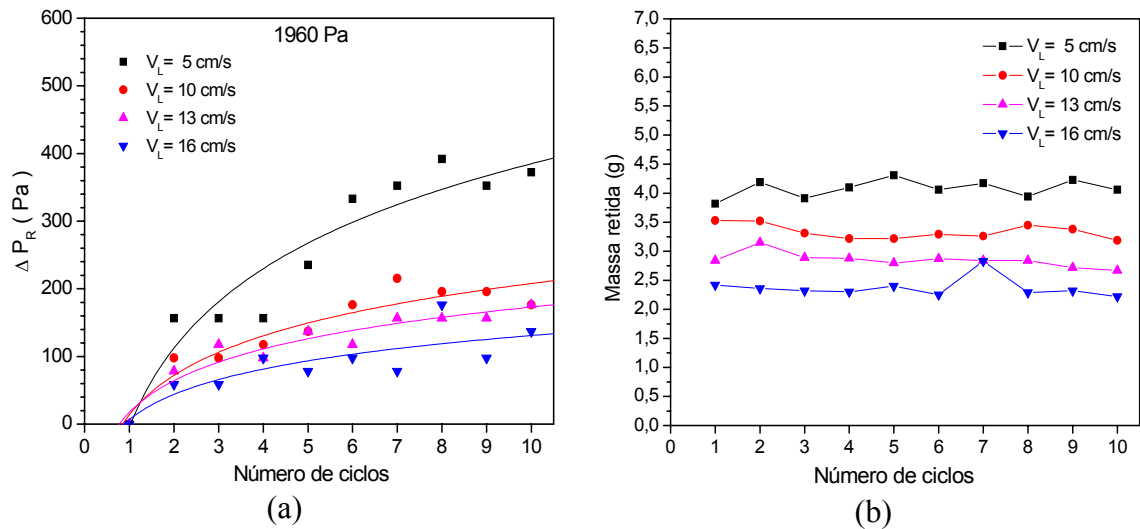


Figura 4.12: (a) Variação da perda de carga residual e (b) massa retida, ambas em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza com  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa.

Como mostra a Figura 4.12 (a), a queda de pressão residual aumentou com o número de ciclos. Entretanto, pode-se verificar um aumento mais pronunciado entre o primeiro e o segundo ciclo, para todas as velocidades aqui investigadas, devido à fase da filtração interna, que ocorreu no primeiro ciclo, durante a formação da torta propriamente dita. A partir do segundo ciclo de filtração, após a primeira limpeza, resíduos de partículas permaneceram retidos, fazendo com que diminuísse a filtração interna e, praticamente, quase toda filtração se desenvolvesse na superfície do filtro. Deste modo, a perda de carga residual apresentou um aumento menos pronunciado a partir do segundo ciclo de filtração. Ainda nessa Figura, observa-se que para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, a perda de carga residual aumentou com o aumento do número de ciclos, enquanto que o mesmo não ocorreu para as demais velocidades.

Outra constatação é que a perda de carga residual, referente à velocidade de limpeza de 5 cm/s, apresentou valores maiores comparado com as demais velocidades de limpeza. O gráfico de massa retida, que se encontra na Figura 4.12 (b), esclarece o fato dos maiores valores de massas retidas se refletirem em maiores valores

de perdas de cargas residuais, como era esperado. Verifica-se também, na Figura 4.12 (b), que a massa retida se mostrou aproximadamente constante com o número de ciclos, para todas as velocidades de limpeza. Comportamento diferente do que foi observado na Figura 4.12 (a), para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, em que a perda de carga residual só aumentou com o número de ciclos. Pode ser que o aumento da perda de carga residual possa ainda estar sendo provocado pela penetração de algumas partículas no meio filtrante. Entretanto, conclusões a esse respeito só poderão ser obtidas mais adiante, ao se analisar o comportamento da remoção em relação ao fenômeno da limpeza por blocos.

Uma última observação acerca da massa retida referente à perda de carga máxima de 1960 Pa, é que apesar da diferença da eficiência de limpeza, para as velocidades de limpeza de 13 e 16 cm/s, ser de aproximadamente 15%, enquanto que entre as velocidades de limpeza de 10 e 13 cm/s essa diferença foi de aproximadamente 5%, estas não se refletiram na massa retida.

Análises semelhantes podem ser feitas para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, como mostram as Figuras 4.13 e 4.14.

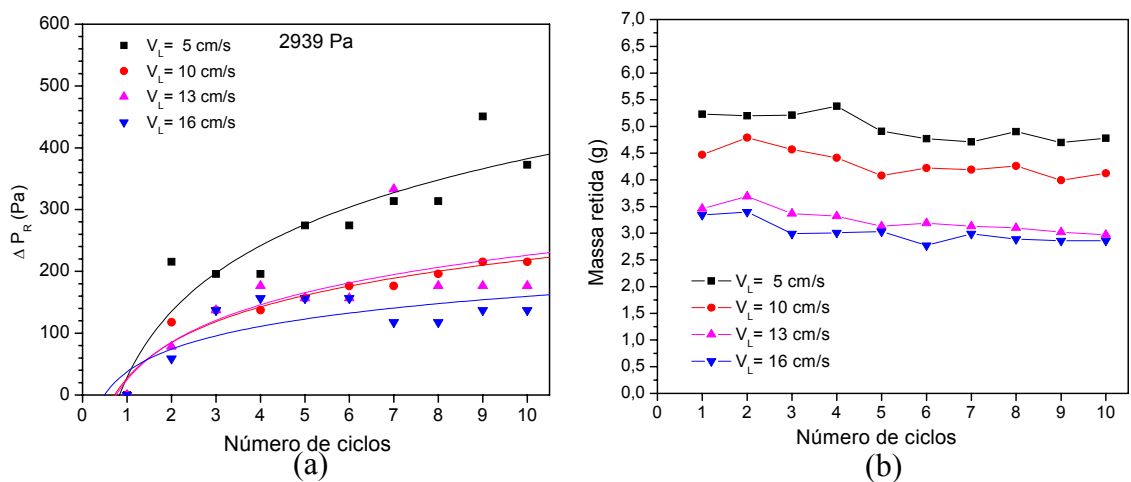


Figura 4.13: (a) Variação da perda de carga residual e (b) massa retida, ambas em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza com  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa.

Pode-se observar através da Figura 4.13 (b) que a massa retida apresentou uma leve diminuição nos primeiros ciclos, tornando-se constante a partir do quinto ciclo de filtração. Apesar dos valores da massa retida, referente à perda de carga máxima de 2939 Pa, terem sido maiores comparados aos da perda de carga máxima de 1960 Pa, os valores e o comportamento da curva de perda de carga residual se mantiveram aproximadamente iguais, para as velocidades de limpeza de 5,10 e 13 cm/s. Entretanto, para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, o valor da perda de carga residual foi um pouco maior comparado com a perda de carga máxima de 1960 Pa, mesmo sendo o valor da massa retida muito próximo ao valor da massa retida referente a velocidade de limpeza de 13 cm/s.

Por fim, através da Figura 4.14 (a), para a perda de carga máxima de 3919 Pa, em relação à perda de carga residual, com o aumento da perda de carga máxima, de 2939 para 3919 Pa, a diferença na curva da perda de carga residual relativa à velocidade de limpeza de 5cm/s diminuiu em relação às demais. Os valores de perda de carga residual referente às velocidades de limpeza de 13 e 16 cm/s permaneceram muito próximos, para valores das perdas de carga máxima de 1960 e 2939 Pa. Para a velocidade de limpeza de 10 cm/s, houve um pequeno aumento dos valores da perda de carga residual, em relação aos valores da perda de carga residual para as perdas de carga máxima de 2939 e 1960 Pa. Já para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, ocorreu uma pequena diminuição dos valores de perda de carga residual, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa, em relação às perdas de carga máxima de 2939 e 1960 Pa.

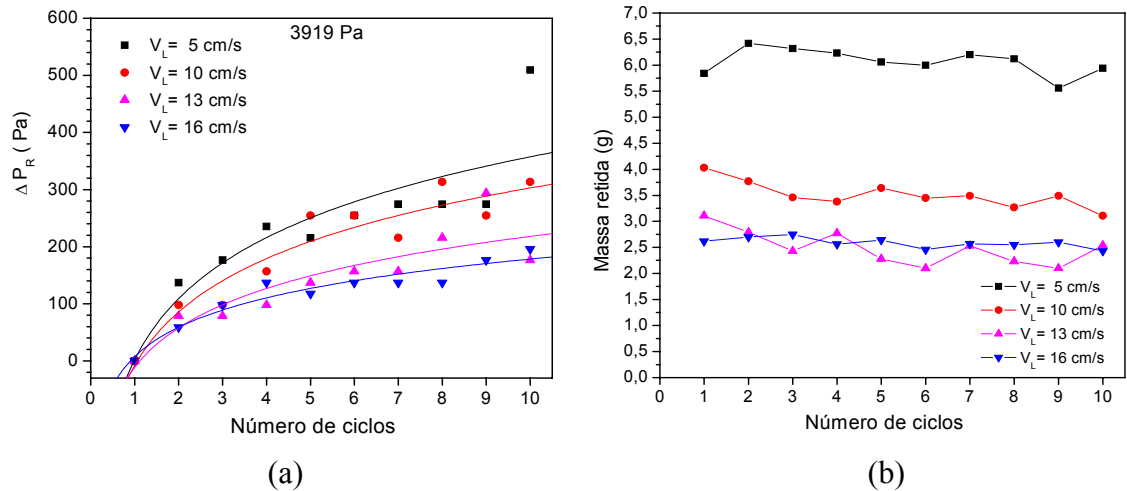


Figura 4.14: (a) Variação da perda de carga residual e (b) massa retida, ambas em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza com  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa.

Ainda na Figura 4.14, o maior valor de massa retida é referente à velocidade de limpeza de 5 cm/s e é justificada pela menor eficiência de remoção devido à baixa velocidade de limpeza. Os valores das massas retidas, para a perda de carga máxima de 2939 Pa, diminuiu de 4,5, 3,25 e 3,25 g, nas velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, respectivamente, para 3,75, 2,7 e 2,7g na perda de carga máxima de 3919 Pa. Em relação à perda de carga máxima de 1960 Pa, a massa retida, para as velocidades de limpeza de 13 e 16 cm/s, foram de 3,0 e 2,25 g respectivamente, e para a perda de carga máxima de 3919 Pa, os valores foram muito próximos, em torno de 2,7 g. Já a massa retida, referente à velocidade de limpeza de 5 cm/s, foi em torno de 4 g para uma perda de carga de 1960 Pa, e para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, os valores das massas retidas foram em torno de 5,0 e 6,25 g , respectivamente.

#### 4.4 Influência da velocidade de limpeza na área total removida, para diferentes perdas de carga máxima, nos diferentes ciclos de filtração e limpeza.



Como citado no item 2.10, a fração de limpeza foi definida em termos de área, sendo que algumas partes da torta são removidas inteiramente e outras permanecem no filtro. O processo de marcação das áreas removidas, apesar de ter sido feito em um programa de análise de imagens, foi realizado manualmente. Isso porque não houve um contraste adequado na imagem entre a parte destacada e a parte que permanecia retida. Dessa forma, o programa não conseguia fazer o reconhecimento. Assim, a área superficial removida era determinada após a contagem das áreas removidas que tiveram sua superfície marcada. A metodologia utilizada para a marcação das áreas foi detalhada no item 3.3.3. Escolheu-se os ciclos 1, 2, 3, 5 e 10, para marcar as áreas removidas para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa. Já para a perda de carga máxima de 1960 Pa, as áreas removidas só foram contadas para os ciclos 1 a 3.

Portanto, a Figura 4.15 mostra a influência da velocidade de limpeza na área superficial limpa do filtro, para diferentes perdas de carga máxima, nos diferentes ciclos que tiveram suas áreas removidas marcadas.

Observa-se, através da Figura 4.15, que para um baixo valor de perda de carga máxima (1960 Pa), não houve um aumento significativo área total removida. Com o decorrer do número de ciclos, esse aumento foi atenuando e tendendo a ficar constante, como pode ser visto no terceiro ciclo. Infelizmente, não foi possível obter as áreas removidas a partir do terceiro ciclo, porque, devido a espessura da torta ser muito fina, não era possível distinguir o que era torta e o que não era.

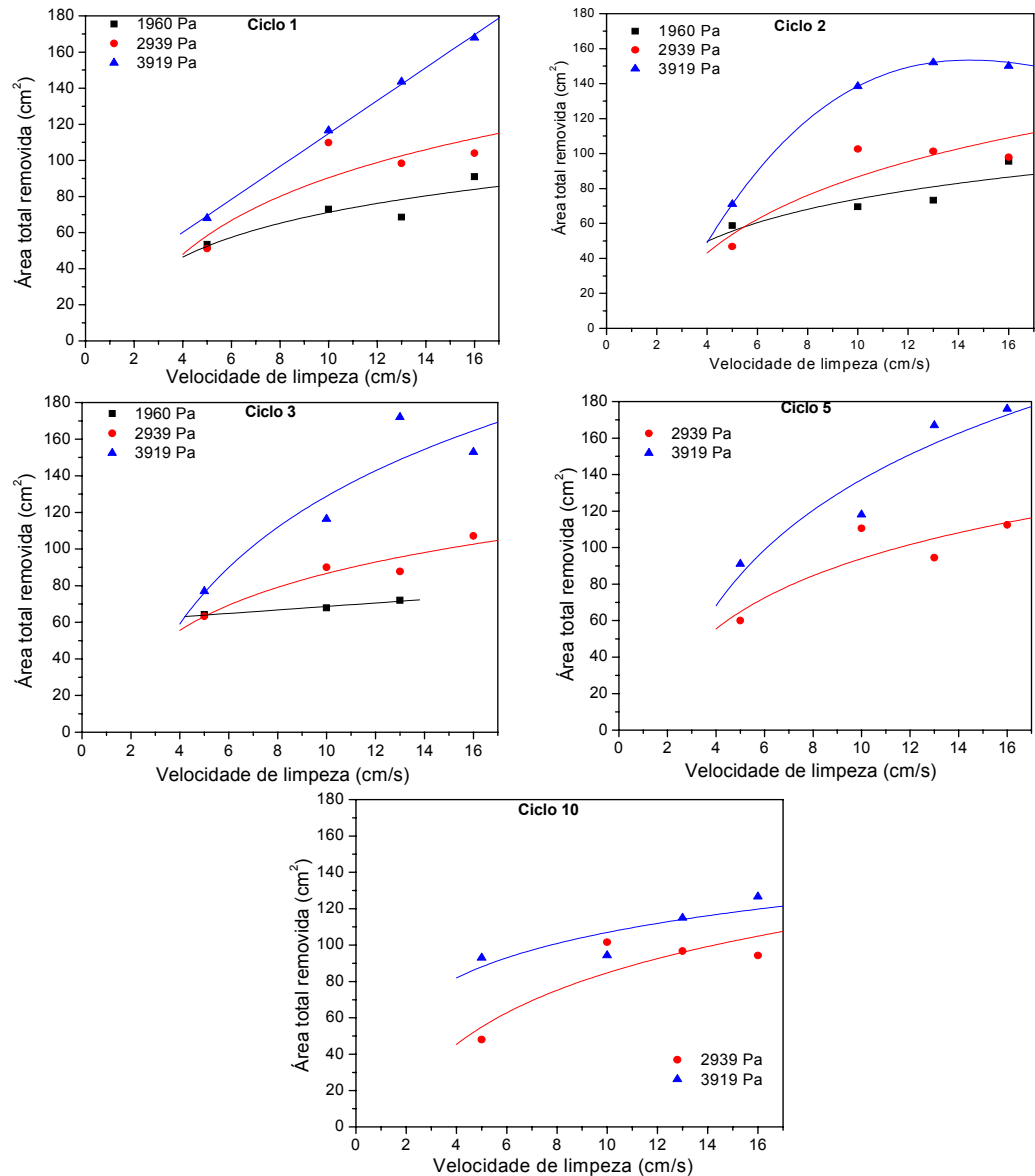


Figura 4.15: Variação da área superficial limpa com a velocidade de limpeza, para diferentes perdas de carga máxima, nos diferentes ciclos de filtração.

Com relação à perda de carga máxima de 2939 Pa, a área total removida apresentou uma tendência de aumentar com o aumento da velocidade de limpeza, em todos os ciclos apresentados. No entanto, esse aumento se tornou menos acentuado a partir da velocidade de limpeza de 10 cm/s. Essa tendência se mantém, ao se passar de uma perda de carga máxima de 2939 para 3919 Pa, a partir da velocidade de limpeza de 13 cm/s, onde a área removida se torna praticamente constante com o aumento da

velocidade de limpeza. O fato da área removida se tornar constante, a partir de um certo valor de velocidade de limpeza pode ser explicado, a exemplo do que aconteceu com a eficiência de limpeza, apresentado na Figura 4.11, onde a eficiência de limpeza se tornou constante a partir da velocidade de limpeza de 13 cm/s, para tortas mais espessas.

#### 4.5 Influência do número de ciclos na área total removida

No item 4.4, foi discutida a variação da área total removida nos diferentes ciclos de filtração e limpeza. A Figura 4.16 mostra o comportamento da área total removida, com o número de ciclos, nas diferentes condições experimentais.

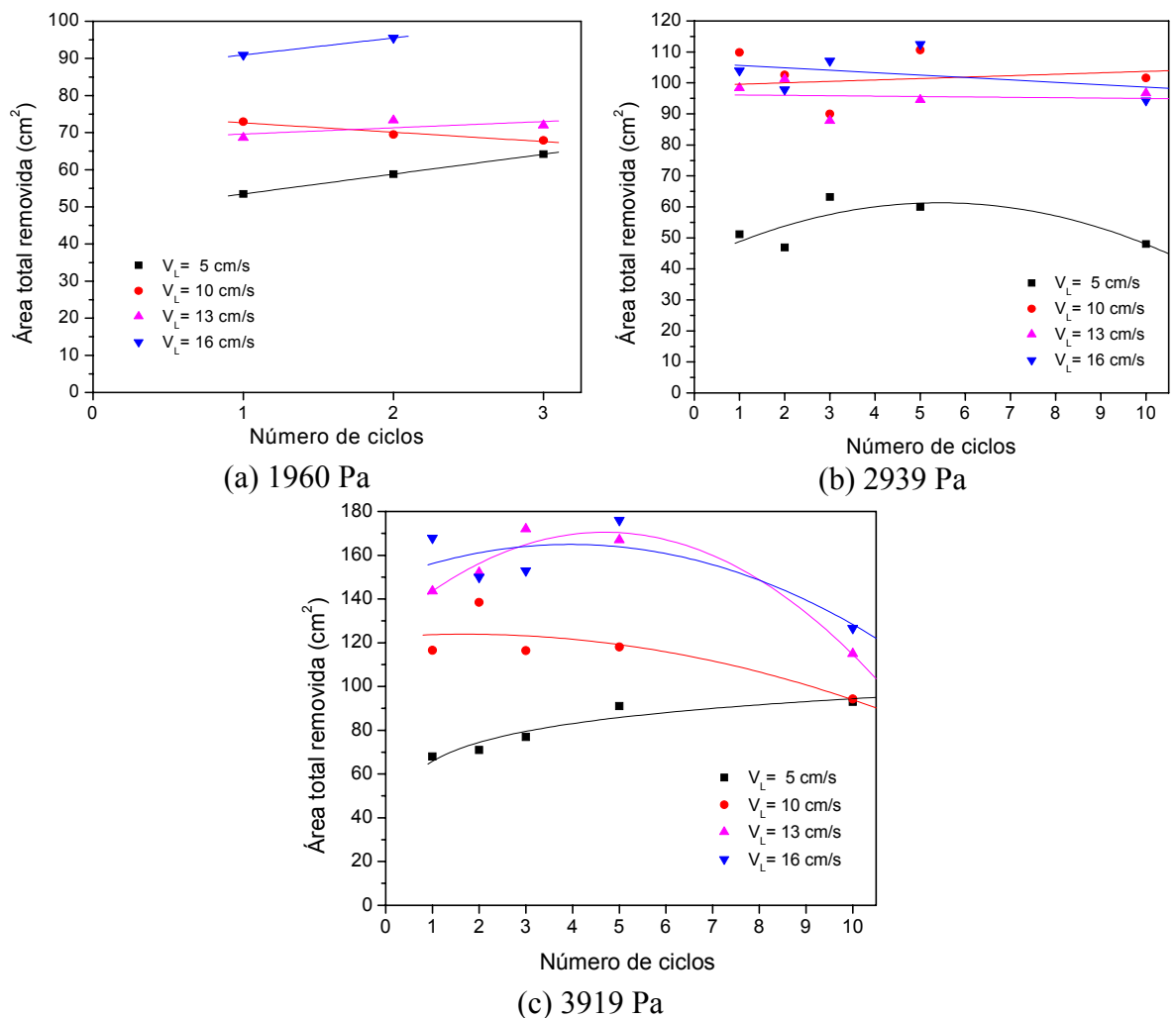


Figura 4.16: Variação da área total removida, com o número de ciclos, para as diversas combinações experimentais.

Como pode ser visto através da Figura 4.16, a área total removida não apresentou um comportamento definido com o decorrer dos ciclos de filtração. Para a espessura de torta fina ( $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa) a área total removida variou em torno de  $60 \text{ cm}^2$  para as velocidades de limpeza de  $5 \text{ cm/s}$ , em torno de  $70 \text{ cm}^2$  para as velocidades de limpeza de  $10$  e  $13 \text{ cm/s}$  e de  $95 \text{ cm}^2$  para a velocidade de limpeza de  $16 \text{ cm/s}$ . Durante a limpeza, observou-se também que a partir do segundo ou terceiro ciclo de filtração, já não era mais possível identificar o que era torta e o que não era, devido à baixa espessura da mesma. Aparentemente, a área removida parecia diminuir com o número de ciclos, uma vez que o tamanho dos pedaços removidos também aparentava diminuir. No entanto, o que aconteceu foi que a espessura da torta era distribuída de maneira não uniforme através do filtro, e o que parecia ser um pedaço de torta removido, na verdade, poderia ser uma torta de espessura tão pequena que causava dúvida na marcação.

Com o aumento da espessura da torta de filtração ( $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa) a área total removida apresentou uma tendência de se tornar constante com o número de ciclos. Já para uma perda de carga máxima de  $3919$  Pa, a área total removida apresentou uma tendência de aumentar até um determinado ciclo de filtração e em seguida voltar a diminuir.

#### **4.6 Influência das condições operacionais no tamanho dos pedaços removidos**

Além dos resultados obtidos acerca da área total removida do filtro, análises sobre o comportamento do tamanho médio dos pedaços de torta removidos do filtro foram abordados. Os itens a seguir mostrarão de forma quantitativa, a variação do tamanho dos pedaços de torta removidos, em termos de área média dos pedaços removidos. Análises serão realizadas sobre variação do tamanho dos pedaços removidos

com a perda de carga máxima (espessura de torta), com a velocidade de limpeza e com o número de ciclos.

#### **4.6.1 Influência da perda de carga máxima no tamanho dos pedaços removidos**

Segundo Koch et al (1996), trabalhando com rocha calcária, observou que o tamanho dos pedaços de tortas removidos aumentava com o carregamento de torta. Desta maneira, investigou-se este fenômeno também para o concentrado fosfático. Como quanto maior o carregamento de torta, maior a perda de carga máxima, a Figura 4.17 mostra a dependência do tamanho dos pedaços removidos com a perda de carga máxima.

Devido à dificuldade de se comparar os pedaços pequenos, somente serão realizadas análises para os pedaços grandes, porque foram os pedaços mais facilmente observados. Na Figura 4.17, foram ilustrados os cinco ciclos de filtração que tiveram suas áreas marcadas. Para os casos em que mais de um pedaço de tamanho grande foi removido, calculou-se a média desses valores.

Como mostra a Figura 4.17, a relação esperada pôde ser observada, ou seja, o aumento do tamanho dos pedaços removidos com a perda de carga máxima, para os cinco ciclos analisados. Entretanto, essa observação, para o primeiro ciclo, foi válida somente para os maiores valores das perdas de carga máxima. Observou-se que, para as velocidades de limpeza de 5, 13 e 16 cm/s, o tamanho médio dos pedaços removidos foi aproximadamente constante,  $20 \text{ cm}^2$ , para as perdas de carga máxima de 1960 e 2939 Pa, onde se observou claramente o aumento do tamanho médio da área dos pedaços removidos ao se utilizar um maior valor perda de carga máxima, ou seja, 3919 Pa. Já para a velocidade de limpeza de 10 cm/s, o aumento do tamanho dos pedaços removidos

foi notado quando se passou de uma perda de carga máxima de 1960 Pa para 2939 Pa, permanecendo aproximadamente constante em  $85 \text{ cm}^2$ , a partir desta perda de carga máxima.

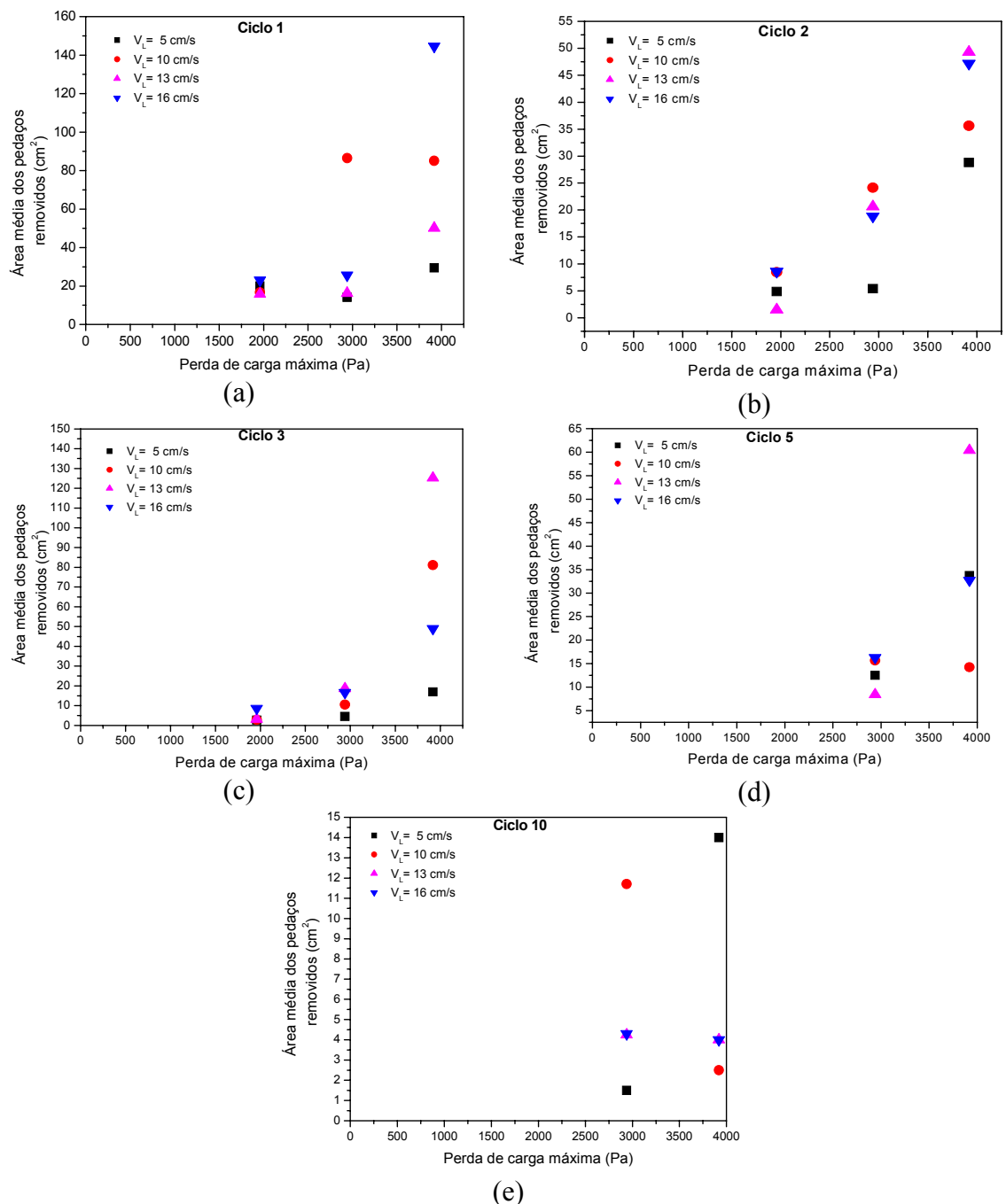


Figura 4.17: Variação da área média dos pedaços de torta removidos, com a perda de carga máxima, para os ciclos 1,2,3,5 e 10.

O fato do tamanho dos pedaços removidos aumentar, no geral, com a espessura da torta de filtração, só vem a confirmar os resultados mostrados por KOCH (1996) e DITTLER et al (2002). Os autores atribuem esse comportamento ao fato de que, com o aumento da espessura da torta de filtração, maiores são as forças coesivas atuando na torta, favorecendo, desta maneira, o destacamento de pedaços maiores.

Para os demais ciclos, deve-se considerar que diversos fatores podem ter interferido nos comportamentos apresentados, sendo o principal deles a torta remanescente, pois não houve o mesmo comportamento nos cinco ciclos analisados.

Além dos resultados quantitativos mostrados na Figura 4.17, as Figuras 4.18 e 4.19 mostram as imagens obtidas através de uma câmera digital, para as perdas de carga máxima de 1960 e 3919 Pa, respectivamente, nas mesmas condições operacionais. Com essas imagens, fica claro o aumento do tamanho das áreas removidas com o aumento da perda de carga máxima.

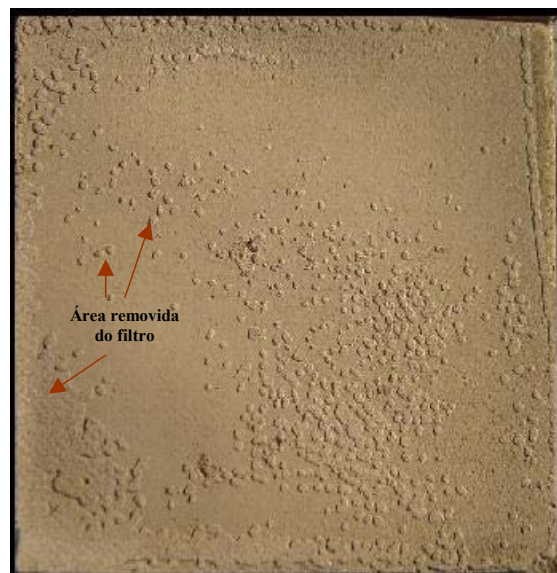


Figura 4.18: Torta de filtração obtida no 1º ciclo de filtração com  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa.

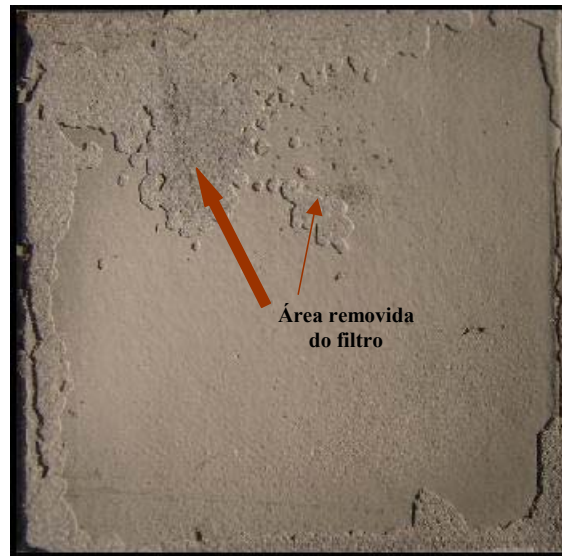


Figura 4.19: Torta de filtração obtida no 1º ciclo de filtração com  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa.

Outra observação que deve ser ressaltada é que, como pode ser observado através das Figuras 4.18 e 4.19, a torta tende a ser destacada mais fortemente nas bordas do filtro. Isto pode ser devido ao fato de que, durante a filtração, o fluxo de ar contendo as partículas se concentra no centro do filtro, fazendo com que haja a compactação da torta neste local, e menos fortemente nas bordas. Desta maneira, a permeabilidade da torta é menor no centro, fazendo com que haja uma tendência do ar atravessar pelas bordas, região de oferece menor resistência para o ar. Logo, a torta destaca-se mais facilmente nas bordas.

#### 4.6.2 Influência da velocidade de limpeza no tamanho dos pedaços removidos

Para um melhor entendimento em relação à variação do tamanho dos pedaços removidos, com a velocidade de limpeza, adotou-se a mesma metodologia utilizada por Rodrigues, 2004. A metodologia se baseia como segue: os pedaços removidos que tiveram o valor da sua área entre 0,01 e 0,1 cm<sup>2</sup> foram tidos como pedaços muito pequenos. Valores compreendidos entre 0,1 e 1 cm<sup>2</sup> foram considerados



pedaços pequenos. Já os pedaços médios foram aqueles que tiveram o valor da sua área entre 1 e 5 cm<sup>2</sup>, e por fim, os pedaços grandes foram os que se destacaram dos demais, que normalmente foram valores muito grandes, dependendo da condição operacional. Esses pedaços foram divididos em classes, assim a classe 1 representou os pedaços muito pequenos, a classe 2 os pedaços pequenos e as classes 3 e 4 os pedaços médios e grandes, respectivamente. Esta metodologia de apresentação foi escolhida devido ao fato dos pedaços removidos terem sido de uma ampla faixa de tamanhos, o que dificultaria a apresentação dos resultados bem como o entendimento do leitor.

Um resumo da metodologia utilizada se encontra na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resumo da metodologia utilizada na apresentação dos pedaços de torta removidos

Classe de tamanhos	Faixa de tamanho (cm <sup>2</sup> )	Classificação do tamanho
1	0,01 – 0,1	Muito pequenos
2	0,1 – 1,0	Pequenos
3	1,0 – 5,0	Médios
4	Maiores que 5	Grandes

Partindo-se desta metodologia, curvas da variação da quantidade dos pedaços removidos, com a velocidade de limpeza, para as diferentes classes de tamanhos podem ser vistas na Figura 4.20, para  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa e primeiro ciclo.

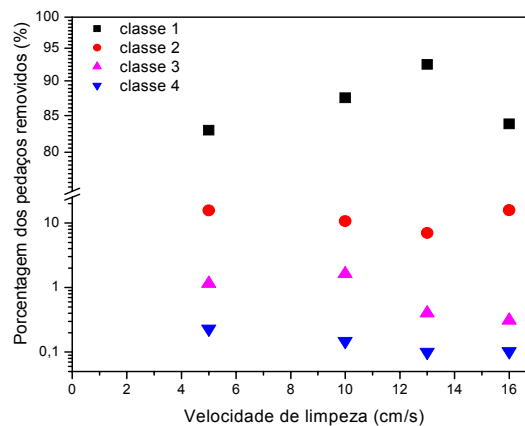


Figura 4.20: Variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho, com a velocidade de limpeza, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e primeiro ciclo de filtração.

Por meio da Figura 4.20, verificou-se que os pedaços muito pequenos, referente à classe 1, representaram a maior porcentagem dos pedaços removidos. E essa porcentagem aumentou com a velocidade de limpeza, exceto para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, em que verificou-se uma diminuição. Para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 13 cm/s, as porcentagens dos pedaços removidos foi de 82,98, 87,54 e 92,48 %, respectivamente. Para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, a porcentagem dos pedaços removidos foi de 83,84%. Desta maneira, pode-se afirmar que a quantidade dos pedaços de torta removidos de tamanhos muito pequenos, que compreende valores entre 0,01 e 0,1 cm<sup>2</sup>, aumentou com a velocidade de limpeza, de uma velocidade de limpeza de 5 cm/s para 13 cm/s. Outra constatação a ser observada na Figura 4.20 é que para os pedaços de tamanho pequeno, referente a classe 2, as porcentagens de pedaços removidos diminuíram de 15,63% para velocidade de limpeza de 5 cm/s, para 10,68% para a velocidade de limpeza de 10 cm/s e de 7,014% para a velocidade de limpeza de 13 cm/s . Já para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, a porcentagem dos pedaços pequenos teve um pequeno aumento, passando para 15,75%. Em relação aos pedaços de torta considerada de tamanho médio, a porcentagem de pedaços removidos teve um leve aumento, de 1,1 para 1,6%, para as velocidades de limpeza de 5 e 10 cm/s, respectivamente. Para as velocidades maiores, a porcentagem dos pedaços removidos diminuiu de 0,4 para 0,31% quando a velocidade de limpeza aumentou de 13 para 16 cm/s. Para os pedaços de tamanho grande, a porcentagem dos pedaços removidos diminuiu de 0,23% para a velocidade de limpeza de 5 cm/s para 0,1% para as velocidades de limpeza de 13 e 16 cm/s.

Análises semelhantes às realizadas para a perda de carga máxima de 1960 Pa foram feitas para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, como mostram as Figuras 4.21 e 4.22.

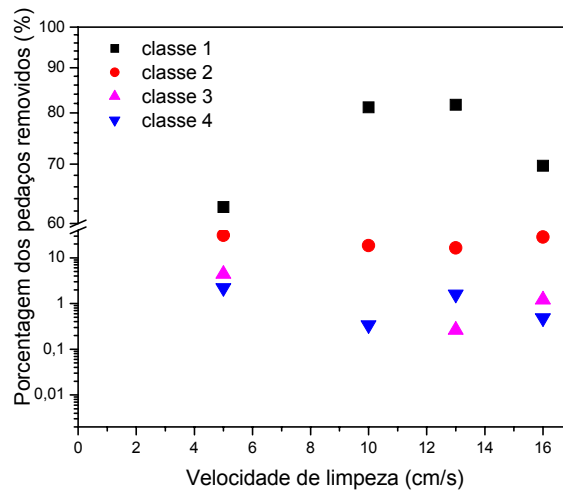


Figura 4.21: Variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho, com a velocidade de limpeza, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e primeiro ciclo de filtração.

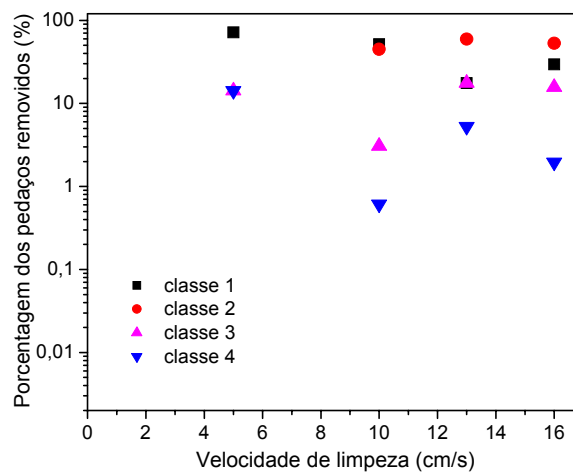


Figura 4.22: Variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho, com a velocidade de limpeza, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e primeiro ciclo de filtração.

Por meio da Figura 4.21, pôde-se verificar o mesmo comportamento apresentado na Figura 4.20, para as classes de tamanho 1 e 2, ou seja, muito pequenos e pequenos. A porcentagem dos pedaços removidos de tamanho muito pequeno passou de 62,64% para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, para 81,17% nas velocidades de

limpeza de 10 e 13 cm/s. Para uma velocidade de limpeza de 16 cm/s, a porcentagem dos pedaços removidos diminuiu para 69,73%. Para a classe 2, referente a pedaços de torta pequenos, a porcentagem de pedaços removidos permaneceu em torno de 20%. Para os pedaços de torta de tamanho médio, as porcentagens dos pedaços removidos foram de 4,4, 0,27 e 1,21% para as velocidades de limpeza de 5, 13 e 16 cm/s, respectivamente. Uma observação a ser feita em relação à perda de carga máxima de 2939 Pa é que para a velocidade de limpeza de 10 cm/s não houveram pedaços removidos de torta de tamanho médio, cujos valores estão compreendidos entre 1 e 5 cm<sup>2</sup>. Já em relação aos pedaços de torta de tamanho grande, a porcentagem dos pedaços removidos diminuiu de 2,2 para 0,34%, quando a velocidade de limpeza aumentou de 5 cm/s para 10 cm/s. Aumentando-se a velocidade de limpeza para 13 cm/s, a porcentagem dos pedaços removidos de tamanho grande voltou a aumentar, sendo igual a 1,59%. Para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, a porcentagem dos pedaços removidos de tamanho grande voltou a diminuir, atingindo um valor igual a 0,48%.

Por fim, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa, presente na Figura 4.22, houve um comportamento distinto das demais perdas de carga. A porcentagem de pedaços muito pequenos diminuiu com o aumento da velocidade de limpeza, até uma velocidade de limpeza de 13 cm/s. Para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, as porcentagens de pedaços muito pequenos foi de 71,42%, diminuindo para 51,53 e 17,54% nas velocidades de limpeza de 10 e 13 cm/s, respectivamente. Para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, a porcentagem de pedaços muito pequenos voltou a aumentar, atingindo um valor de 29,41%. Para os pedaços de tamanho pequeno, para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, não houveram pedaços compreendidos nesta faixa de tamanho. As porcentagens de pedaços removidos de tamanho pequeno foram de 44,78,

60 e 52,94% , para as velocidades de limpeza de 10,13 e 16 cm/s, respectivamente. Para os pedaços removidos de tamanho médio, com o aumento da velocidade de limpeza, de 5 para 10 cm/s, houve um decréscimo na porcentagem dos pedaços removidos de tamanho médio, passando de 14,28 para 3% dos pedaços removidos. Para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, a porcentagem dos pedaços removidos de tamanho médio voltou a aumentar, para 17,54%, voltando a diminuir para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, cujo valor foi de 16% dos pedaços removidos. Por fim, para os pedaços removidos de tamanho grande apresentou o mesmo comportamento apresentado pelos pedaços de tamanho médio.

Como pôde ser observado nas discussões anteriores, indiferente da condição utilizada, a maioria dos pedaços removidos foram relativos aos pedaços muito pequenos, ou seja, os pedaços que apresentaram tamanho menor do que  $0,1 \text{ cm}^2$ . Desta forma, os resultados apresentados ratificam os resultados mostrados por DITTLER et al (2002), onde o autor mostrou que a maior parte dos pedaços removidos apresentou tamanho menor do que  $10 \text{ mm}^2$  ( $0,1 \text{ cm}^2$ ).

#### **4.7 Relação entre a porcentagem de pedaços removidos e a porcentagem da área total removida**

Após a discussão sobre o comportamento da variação das várias faixas de tamanhos dos pedaços removidos, nas várias condições experimentais, nesse item serão apresentadas as distribuições de tamanho dos pedaços removidos, bem como a distribuição do número de pedaços removidos. Desta maneira, pode-se ter uma noção de quanto cada faixa de tamanho representa na área total removida e no número total de pedaços removidos.

A Figura 4.23 mostra o comportamento da distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos, em relação a área total removida e em relação ao número de pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração, em diferentes velocidades de limpeza, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa.

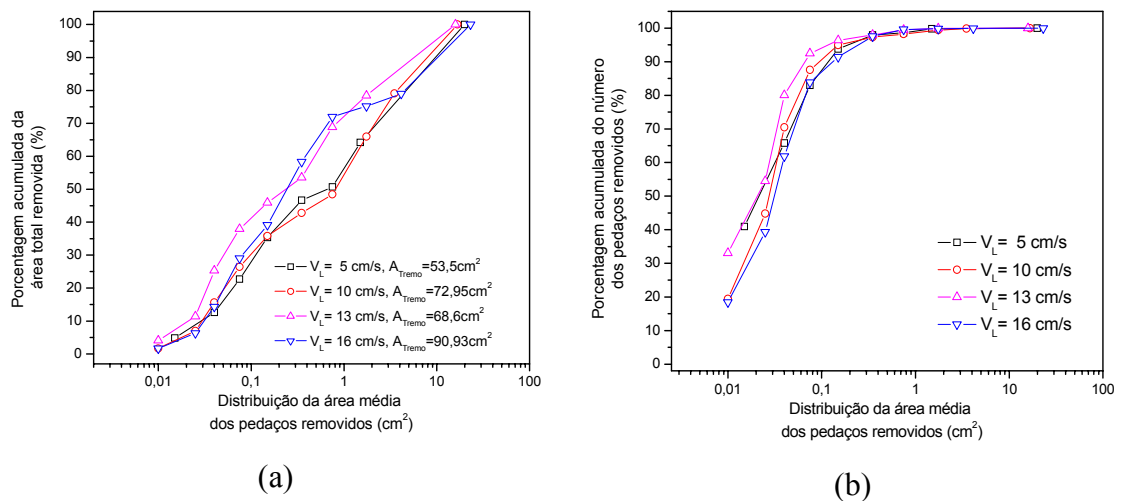


Figura 4.23: (a) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos na área total removida e (b) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 1960 Pa.

Verifica-se através da Figura 4.23 (a) que, para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, aproximadamente 25% da área total removida possui tamanho médio de área dos pedaços removidos menor do que  $0,1 \text{ cm}^2$ , e que esses 25% são relativos a aproximadamente 83% do número total dos pedaços removidos menores do que  $0,1 \text{ cm}^2$ , como mostra a Figura 4.23 (b). Seguindo as curvas de distribuição relativas a velocidade de limpeza de 5 cm/s, 58% da área total removida possui tamanho médio dos pedaços removidos menor do que  $1 \text{ cm}^2$ , o que corresponde a aproximadamente 99% dos pedaços removidos. Isso mostra que os pedaços de tamanho muito pequenos e pequenos correspondem quase que a totalidade do número dos pedaços removidos, visto que, na velocidade de limpeza de 5 cm/s, houve pedaços com tamanho aproximado de  $20 \text{ cm}^2$ , que pode ser observado na Figura 4.23 (a).

Para as velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, as porcentagens de área total removida que possuem tamanho médio da área dos pedaços removidos menor do que  $0,1 \text{ cm}^2$  são respectivamente 30, 42 e 35%, que correspondem a porcentagens do número dos pedaços removidos de 90, 94 e 85%. Já para os tamanhos de pedaços removidos menores do que  $1 \text{ cm}^2$ , as porcentagens de área total removida são 55, 75 e 76% para as velocidades de limpeza de 10,13 e 16 cm/s, que correspondem a 99, 99,6 e 99,7%, respectivamente, dos pedaços removidos. Logo, para uma perda de carga de 1960 Pa, com o aumento da velocidade de limpeza, na faixa estudada, há um aumento da porcentagem de pedaços removidos com área média menor do que  $1 \text{ cm}^2$ , atingindo 99,7% dos pedaços removidos, na velocidade de limpeza de 16 cm/s. Para os pedaços removidos menores do que  $0,1 \text{ cm}^2$ , a porcentagem dos pedaços removidos de tamanho menor do que  $0,1 \text{ cm}^2$  aumenta até uma velocidade de 13 cm/s, atingindo 94% dos pedaços removidos, diminuindo na velocidade de limpeza de 16 cm/s, para 85% dos pedaços removidos.

No entanto, além dos pedaços removidos com tamanho menor do que  $1 \text{ cm}^2$ , também houveram pedaços removidos com tamanhos maiores, que pode ser observado na Figura 4.23 (a). Para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, o tamanho máximo dos pedaços removidos foi de aproximadamente  $20 \text{ cm}^2$ . Para as velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, os maiores pedaços removidos alcançaram valores de 16,71, 15,85 e  $23,05 \text{ cm}^2$ , respectivamente.

A exemplo da Figura 4.23, a Figura 4.24 mostra o comportamento da distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos, em relação à área total removida e ao número de pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração, em diferentes velocidades de limpeza, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa.

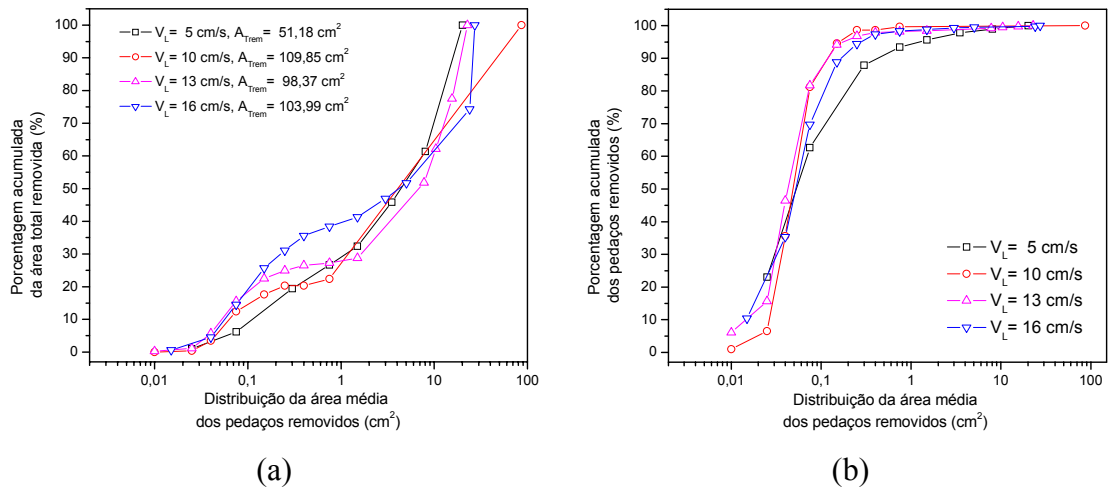


Figura 4.24: (a) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos na área total removida e (b) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 2939 Pa.

A análise da Figura 4.24 (a) mostra que, para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, aproximadamente 10% da área total removida possui tamanho médio de área dos pedaços removidos menor do que  $0,1$  cm<sup>2</sup>, o que representa aproximadamente 83% do número total dos pedaços removidos, como mostra a Figura 4.24 (b). Para as velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, a porcentagem da área total removida que possui tamanho médio da área dos pedaços removidos menor do que  $0,1$  cm<sup>2</sup> é de 14, 19 e 19%, respectivamente, representando 75, 85 e 85% dos pedaços removidos. Desta forma, a partir de uma velocidade de limpeza de 13 cm/s, aproximadamente 19% da área total removida foi relativa a pedaços removidos de tamanhos menores do que  $0,1$  cm<sup>2</sup>, o que correspondeu a aproximadamente 85% dos pedaços removidos.

Em relação aos pedaços removidos menores do que  $1$  cm<sup>2</sup>, a porcentagem da área total removida que possui tamanho médio da área dos pedaços removidos menores do que  $1$  cm<sup>2</sup> foi de aproximadamente 30%, para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 13 cm/s, passando para 40% na velocidade de limpeza de 16 cm/s. Estes valores correspondem a 95, 99, 99 e 99% da porcentagem dos pedaços removidos.



Então para uma perda de carga máxima de 2939 Pa, a partir de uma velocidade de limpeza de 10 cm/s, 99% dos pedaços removidos apresentaram tamanho médio da área dos pedaços removidos menor do que 1 cm<sup>2</sup>. Para os pedaços removidos de tamanho grande, os valores máximos alcançados pelas velocidades de limpeza de 5, 10, 13 e 16 cm/s foram de 20,1, 86,5, 22,8 e 27,3 cm<sup>2</sup>, respectivamente.

Para a perda de carga máxima de 3919 Pa, a Figura 4.25 mostra, a exemplo das perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, o comportamento da distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos, em relação a área total removida e em relação ao número de pedaços removidos, também para o primeiro ciclo de filtração, em diferentes velocidades de limpeza.

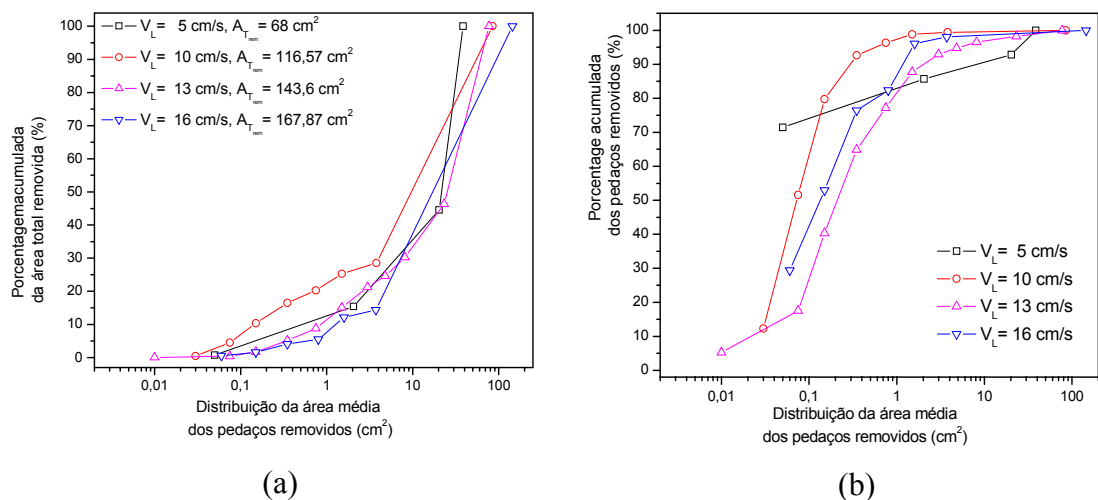


Figura 4.25: (a) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos na área total removida e (b) Comportamento da distribuição da área média dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3919 Pa.

Verifica-se através da Figura 4.25, um comportamento distinto daqueles apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24. Os pedaços de torta removidos de tamanho menores do que 0,1 cm<sup>2</sup> representaram 4, 7, 2 e 2% da área total removida do filtro para as velocidades de limpeza de 5, 10, 13 e 16 cm/s, respectivamente. Desta maneira, com o aumento da velocidade de limpeza, de 5 para 10 cm/s, houve um aumento na

porcentagem da área total removida com tamanho dos pedaços removidos menores do que  $0,1 \text{ cm}^2$ , voltando a diminuir ao se aumentar a velocidade de limpeza para  $13 \text{ cm/s}$ . Já para os pedaços removidos menores do que  $1 \text{ cm}^2$ , a porcentagem da área total removida com tamanho dos pedaços removidos menores do que  $1 \text{ cm}^2$  é de 12, 25, 12 e 10% para as velocidades de limpeza de 5, 10, 13 e  $16 \text{ cm/s}$ , respectivamente, representando 84, 97, 84 e 88% dos pedaços removidos. Os tamanhos máximos das áreas removidas foram de 38,6, 85,13, 77,19 e  $144,55 \text{ cm}^2$ , para as velocidades de limpeza de 5, 10, 13 e  $16 \text{ cm/s}$ , respectivamente.

#### **4.8 Influência da distribuição de tamanho dos pedaços removidos na perda de carga residual**

Durante a discussão dos resultados, não se percebeu nenhuma relação entre os resultados até aqui deparados e a perda de carga residual. As Tabelas 4.2 a 4.4 mostram o comportamento da distribuição do tamanho dos pedaços removidos, em todas as condições experimentais estipuladas. Através das Tabelas 4.2 a 4.4, pôde-se perceber que, em um mesmo ciclo, pode existir vários tamanhos de pedaços removidos, o que faz com que essa distribuição não homogênea dos pedaços removidos possa ter influenciado no aumento da perda de carga residual, com o número de ciclos, uma vez que, como foi discutido anteriormente, a massa retida e a área total removida não justificaram o comportamento apresentado na perda de carga residual.

Desta maneira, o seguinte item investigará o comportamento da distribuição dos pedaços removidos, com o número de ciclos, a fim de tentar esclarecer o comportamento apresentado pela perda de carga residual.

Através das Tabelas 4.2 a 4.4, verificou-se que com o decorrer do número de ciclos houve uma diminuição no tamanho médio dos pedaços maiores, e a partir de um determinado ciclo houve uma tendência da distribuição do tamanho dos pedaços removidos se tornar aproximadamente constante.

Através da Figura 4.12, para  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960\text{Pa}$ , quando se discutiu o comportamento da perda de carga residual, com o número de ciclos, verificou-se que para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s a perda de carga residual começou a apresentar tendência a se tornar constante, a partir do oitavo ciclo. Já em relação à distribuição de tamanho dos pedaços removidos, na Tabela 4.2, para a mesma velocidade, nada pôde ser concluído, pois somente foram marcadas as áreas dos ciclos 1,2 e 3. Logo, seria prematuro concluir alguma coisa a respeito da relação entre a perda de carga residual e sua respectiva distribuição de tamanho dos pedaços removidos. O mesmo pôde ser concluído para as velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, porque nestas condições, só foram marcados, a exemplo da velocidade de limpeza de 5 cm/s, os ciclos 1,2 e 3.

Tabela 4.2: Variação da distribuição da área média dos pedaços removidos, com o número de ciclos, para  $\Delta P_{\text{máx}}=1960$  Pa e diferentes velocidades de limpeza

Perda de carga máxima de 1960 Pa						
Velocidade de limpeza (cm/s)	Ciclo 1 (cm <sup>2</sup> )	Número de pedaços removidos	Ciclo 2 (cm <sup>2</sup> )	Número de pedaços removidos	Ciclo 3 (cm <sup>2</sup> )	Número de pedaços removidos
5	0,015	178	0,015	142	0,015	103
	0,04	108	0,04	75	0,04	64
	0,075	75	0,075	137	0,075	104
	0,15	47	0,15	92	0,15	74
	0,35	18	0,35	35	0,35	62
	0,75	3	0,75	9	0,75	15
	1,5	5	2	6	1,5	7
	19,93	1	4,86	1	2,74	1
10	0,01	131	0,01	88	0,01	115
	0,025	171	0,025	88	0,025	156
	0,04	173	0,04	187	0,04	164
	0,075	115	0,075	182	0,075	209
	0,15	50	0,15	93	0,15	76
	0,35	16	0,35	46	0,35	45
	0,75	6	0,75	10	0,75	6
	1,75	8	1,75	3	1,75	3
	3,5	3	8,48	1	3,5	3
	16,71	1				
13	0,01	330	0,01	230	0,01	227
	0,025	214	0,025	188	0,025	224
	0,04	255	0,04	283	0,04	280
	0,075	124	0,075	289	0,075	272
	0,15	39	0,15	117	0,15	103
	0,35	16	0,25	26	0,35	36
	0,75	15	0,4	13	0,75	5
	1,75	4	0,75	8	1,5	3
	15,85	1	1,5	2	3,1	1
	16	0,01	180	0,01	64	
0,025		205	0,025	90		
0,04		220	0,04	165		
0,075		215	0,075	323		
0,15		74	0,15	214		
0,35		60	0,25	43		
0,75		20	0,4	16		
1,75		2	0,75	8		
4,15		1	1,5	2		
23,05		1	8,6	1		

Tabela 4.3: Variação da distribuição da área média dos pedaços removidos, com o número de ciclos, para  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa e diferentes velocidades de limpeza

Perda de carga máxima de 2939 Pa										
Vel. limpeza (cm/s)	Ciclo 1 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 2 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 3 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 5 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 10 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos
5	0,025	21	0,025	41	0,025	33	0,025	18	0,025	175
	0,075	36	0,075	33	0,075	25	0,075	39	0,075	120
	0,3	23	0,15	36	0,15	25	0,15	44	0,15	68
	0,75	5	0,35	30	0,35	24	0,35	10	0,35	62
	1,5	2	0,75	13	0,75	10	0,75	15	0,75	6
	3,5	2	1,5	6	1,5	10	2,5	4	1,5	2
	8,05	1	3	2	3,5	7	7,95	1		
20,12	1	5,41	1	5,52	1	17,84	1			
10	0,01	3	0,01	39	0,01	39	0,01	8	0,01	75
	0,025	16	0,025	41	0,025	32	0,025	14	0,025	63
	0,04	85	0,04	69	0,04	63	0,04	54	0,04	83
	0,075	133	0,075	105	0,075	120	0,075	121	0,075	136
	0,15	39	0,15	95	0,15	81	0,15	107	0,15	123
	0,25	12	0,25	37	0,25	36	0,25	41	0,25	49
	0,4	0	0,4	34	0,4	32	0,4	51	0,4	41
	0,75	3	0,75	20	0,75	17	0,75	21	0,75	22
	86,53	1	1,5	10	1,5	5	1,5	6	1,5	7
			2,26	1	2,5	2	2,5	3	2,5	2
		24,16	1	5,1	1	4	2	11,7	1	
				16,77	1	15,66	1			
13	0,01	23	0,01	13	0,01	33	0,01	11	0,01	52
	0,025	36	0,025	27	0,025	33	0,025	48	0,025	53
	0,04	116	0,04	77	0,04	85	0,04	77	0,04	105
	0,075	133	0,075	89	0,075	123	0,075	147	0,075	196
	0,15	47	0,15	81	0,15	88	0,15	149	0,15	137
	0,25	10	0,25	35	0,25	37	0,25	46	0,25	58
	0,4	4	0,4	36	0,4	25	0,4	30	0,4	30
	0,75	1	0,75	23	0,75	24	0,75	24	0,75	25
	1,5	1	1,5	14	1,5	5	1,5	4	1,5	5
	7,8	3	2,1	1	2	1	3	2	2,10	1
	10,44	1	20,63	1	18,58	1	8,40	1	6,33	1
15,58	1									
22,78	1									
16	0,015	43	0,01	16	0,01	2	0,01	4	0,01	21
	0,04	103	0,025	24	0,025	13	0,025	21	0,025	38
	0,075	142	0,04	49	0,04	34	0,04	48	0,04	85
	0,15	79	0,075	93	0,075	63	0,075	93	0,075	152
	0,25	23	0,15	80	0,15	77	0,15	107	0,15	118
	0,4	12	0,25	47	0,25	45	0,25	44	0,25	49
	0,75	4	0,4	26	0,4	36	0,4	35	0,4	33
	1,5	2	0,75	24	0,75	22	0,75	32	0,75	18
	3	2	1,5	8	1,5	14	1,5	17	1,5	11
	5,05	1	2,5	3	2,5	2	2,5	2	2,5	2
	24,01	1	3,12	1	3,28	1	16,29	1	6,14	1
	27,31	1	18,84	1	6,84	1				
				16,64	1					

Tabela 4.4: Variação da distribuição da área média dos pedaços removidos, com o número de ciclos, para  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa e diferentes velocidades de limpeza

Perda de carga máxima de 3919 Pa										
Vel. limpeza (cm/s)	Ciclo 1 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 2 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 3 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 5 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos	Ciclo 10 (cm <sup>2</sup> )	nº de pedaços removidos
5	0,05	10	0,025	24	0,025	35	0,025	14	0,025	31
	2,05	2	0,075	17	0,075	20	0,075	33	0,075	34
	20,29	1	0,55	27	0,55	41	0,55	72	0,55	103
	38,62	1	2,5	4	2,5	6	2	10	2	10
			7	4	7,96	1	4,5	4	4,5	2
			28,81	1	17,56	1	33,74	1	7,25	1
					25,36	1			20,69	1
10	0,03	20	0,035	15	0,02	22	0,02	6	0,025	51
	0,075	64	0,075	17	0,035	23	0,04	15	0,04	88
	0,15	46	0,15	16	0,075	33	0,075	39	0,075	153
	0,35	21	0,35	14	0,15	44	0,15	49	0,15	140
	0,75	6	0,75	9	0,35	28	0,25	37	0,25	69
	1,5	4	1,3	4	0,75	13	0,35	30	0,35	43
	3,8	1	2,5	4	1,5	2	0,75	18	0,75	23
	85,13	1	4,5	2	2,2	2	1,3	5	1,1	4
			5,5	2	81,11	1	2,1	2	2,5	2
			7	3			4	1		
			10	3			6	2		
		35,62	1			9,5	1			
						19	2			
13	0,01	3	0,035	6	0,01	4	0,04	5	0,015	44
	0,075	7	0,075	19	0,075	7	0,075	16	0,04	58
	0,15	13	0,15	14	0,15	9	0,15	18	0,075	101
	0,35	14	0,35	26	0,35	18	0,35	15	0,15	92
	0,75	7	0,75	12	0,75	4	0,75	8	0,25	39
	1,5	6	1,5	6	1,5	8	1,5	6	0,4	48
	3	3	3	6	3	4	3	3	0,75	33
	4,81	1	5	2	5,53	1	4,5	3	1,5	18
	8,14	1	16,53	1	8,63	1	46,54	1	2,5	4
	23,14	1	82,1	1	125,23	1	74,27	1	4	2
77,19	1									
16	0,06	15	0,03	14	0,04	2	0,035	14	0,035	83
	0,15	12	0,075	32	0,075	10	0,075	22	0,075	86
	0,35	12	0,15	30	0,15	21	0,15	18	0,15	80
	0,8	3	0,35	21	0,35	4	0,35	21	0,35	76
	1,6	7	0,75	15	0,75	8	0,75	16	0,75	41
	3,72	1	1,5	6	1,5	6	1,5	11	1,5	16
	144,55	1	2,25	3	2	1	2,5	5	2,5	10
			6,64	1	5,5	3	4	8	4	2
			8,19	1	16,94	1	21,29	1		
			26,08	1	39,76	1	29,14	1		
		68,29	1	58,65	1	47,76	1			

Em relação à perda de carga máxima de 2939 Pa, a Figura 4.13 (a) mostrou que para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, a perda de carga residual não apresentou tendência de se tornar constante com o número de ciclos. A distribuição dos tamanhos dos pedaços removidos também não mostrou nenhuma tendência de se ter uma distribuição homogênea com o decorrer do número de ciclos. Através da Tabela 4.3, verificou-se, em todos os ciclos, uma ocorrência dos tamanhos pequenos, sendo que esses pedaços, de um ciclo para outro, foram da mesma ordem de tamanho. Já para os maiores pedaços, de um ciclo para outro, houve uma significativa variação no tamanho, fazendo com que a distribuição de tamanhos dos pedaços removidos não apresentasse tendência a se tornar constante. Isto pode ter contribuído para que a perda de carga residual, na velocidade de limpeza de 5 cm/s, não apresentasse tendência de se tornar constante. Entretanto, no décimo ciclo, a distribuição do tamanho dos pedaços removidos começou a ser mais homogênea, não havendo grandes pedaços removidos. Para se tirar maiores conclusões sobre a estabilidade desta condição de limpeza, após o décimo ciclo, seria necessário obter um número maior de ciclos de filtração e, também, da marcação destas áreas.

No entanto, observa-se, ainda na Tabela 4.3, para a perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s, que para os ciclos 2 e 3 as distribuições dos tamanhos dos pedaços removidos foi aproximadamente a mesma, enquanto que a perda de carga residual se mostrou constante. Isto pode estar mostrando uma relação direta entre a perda de carga residual e a distribuição do tamanho dos pedaços removidos, ou seja, quando a distribuição dos pedaços removidos é aproximadamente a mesma de um ciclo para outro ou se torna constante, a perda de carga residual tende a diminuir ou se tornar constante.

Na Tabela 4.3, nota-se, para uma velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 2939 Pa, que a distribuição do tamanho dos pedaços removidos começou a ser aproximadamente constante a partir do terceiro e quinto ciclo de filtração. O mesmo aconteceu em relação à perda de carga residual, apresentada na Figura 4.13 (a), onde esta também começou a se tornar constante a partir do quinto ciclo de filtração. Para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, os tamanhos dos pedaços removidos foram aproximadamente iguais a partir do quinto ciclo e a perda de carga residual também apresentou tendência de se tornar constante a partir do quinto ciclo. Já para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, houve uma diminuição no tamanho dos maiores pedaços removidos, a partir do terceiro ciclo de filtração. Isso fez com que a distribuição dos tamanhos removidos se tornasse aproximadamente constante. A perda de carga residual também apresentou tendência a se tornar constante a partir do terceiro ciclo de filtração.

Para a perda de carga máxima de 3919 Pa, para as velocidades de limpeza de 5 e 10 cm/s, o comportamento da perda de carga residual, apresentado na Figura 4.14 (c), apresentou muitas variações no decorrer do número de ciclos, não apresentando tendência em se tornar constante. O mesmo comportamento pôde ser observado nas distribuições dos tamanhos destas duas condições experimentais, como mostra a Tabela 4.4. Para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, houve uma sutil diminuição no tamanho dos pedaços removidos, fazendo com que a distribuição do tamanho dos pedaços apresentasse uma tendência de se tornar constante, o mesmo comportamento foi apresentado para a perda de carga residual. Já para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, não se observou nenhuma relação entre a perda de carga residual e sua respectiva distribuição de tamanho dos pedaços removidos.



Uma última observação a ser feita é que, como pôde ser notado nas Figuras 4.12 e 4.13, as perdas de carga residuais apresentaram tendência em se tornar constante, principalmente para altas velocidades de limpeza. Isto pode ter sido devido ao fato de que, com o aumento da velocidade de limpeza, houve um aumento na quantidade dos pedaços removidos e conseqüentemente uma diminuição do tamanho desses pedaços. Este fato fez com que os pedaços removidos tendessem a se distribuir de maneira mais homogênea com o decorrer do número de ciclos, como pode ser visto na Tabela 4.4.

A partir das análises apresentadas nesse estudo, conclui-se que a perda de carga residual pode estar intimamente associada à distribuição de tamanho dos pedaços de torta removidos. É claro que outros fatores também podem ter influenciado no comportamento da perda de carga residual, como a penetração de pó no meio filtrante. Entretanto, para tal finalidade, seria necessário, além dos ensaios realizados, etapas que constituíssem em tratamentos das amostras, após cada ciclo de filtração, e que pode ser encontrado em Aguiar (1995). No entanto, essas análises do comportamento de penetração não é objetivo deste trabalho, ficando sob a responsabilidade de trabalhos específicos acerca deste tema.

#### **4.9 Influência do número de ciclos na quantidade dos pedaços removidos**

Como foi discutido anteriormente, a área total removida não apresentou um comportamento definido com o número de ciclos. No entanto, através de observações durante os experimentos, a quantidade dos pedaços de torta removidos, durante a limpeza, aparentavam diminuir com o número de ciclos. Desta maneira, a

Figura 4.26 mostra o comportamento da variação do número de pedaços removidos, com o número de ciclos.

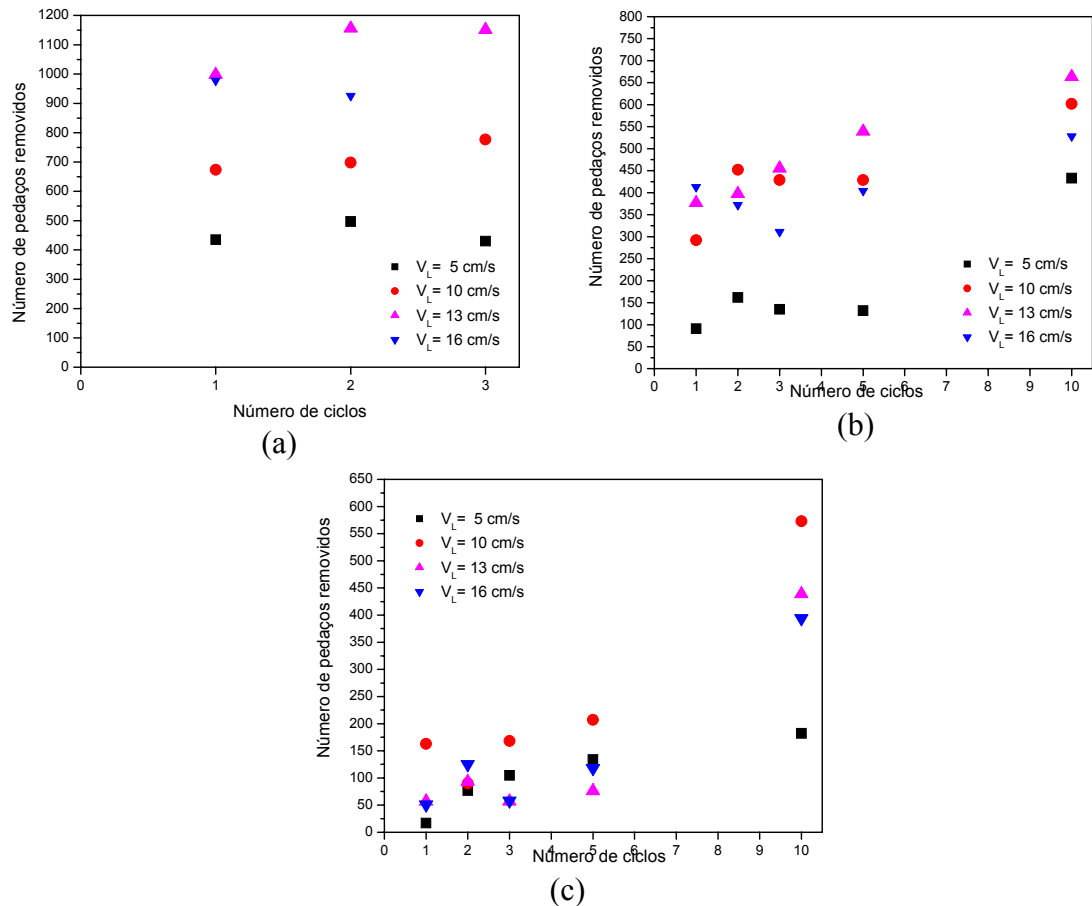


Figura 4.26: Variação do número de pedaços removidos, com o número de ciclos, para as perdas de carga máxima de (a) 1960 Pa, (b) 2939 Pa e (c) 3919 Pa.

Observa-se, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, nos três primeiros ciclos de filtração, para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, o número de pedaços removidos foi aproximadamente constante com o número de ciclos, enquanto que para as velocidades de limpeza de 10 e 13 cm/s houve um aumento na quantidade de pedaços removidos. Já, para a velocidade de limpeza de 16 cm/s nada se pode concluir sobre a tendência da quantidade de pedaços removidos com o número de ciclos, porque foram obtidas somente as áreas dos dois primeiros ciclos de filtração.

Para as perdas de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, apesar da oscilação da variação do número dos pedaços removidos, houve uma tendência de aumento do número de pedaços removidos com o número de ciclos. Como foi discutido anteriormente, as eficiências de limpeza apresentaram comportamentos aproximadamente constante, e o tamanho dos pedaços removidos diminuiu com o aumento do número de ciclos. Desta maneira, o número de pedaços removidos tende a aumentar com o número de ciclos.

Os resultados obtidos no presente trabalho concordaram com os resultados obtidos por DITTLER et al (2002), em que o autor, utilizando como técnica de limpeza o pulso de ar comprimido, observou um aumento do número de pedaços removidos com o decorrer dos ciclos de filtração.

#### **4.10 Comparação entre as frações de massa e de área removida**

Inicialmente, foi proposta a comparação entre as frações de massa e de área removida da torta de filtração, pois ambas as frações de limpeza são utilizadas para caracterizar a limpeza por blocos. A comparação entre essas duas frações se faz necessária para verificar a relação existente entre elas.

A Figura 4.27 mostra a comparação entre as duas frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, em diferentes velocidades de limpeza. Pode-se observar que a fração de massa removida apresentou maiores valores se comparada com a fração de área removida. Isto se deve ao fato de que a área removida é calculada somente superficialmente. Já a fração de massa removida, considera-se toda a massa destacada do filtro. A área total removida era contada pelas áreas marcadas dos blocos que foram destacados completamente, exceto para uma fina camada residual

presente. No entanto, para tortas muito finas e devido a não homogeneidade de deposição da camada de pó no tecido, a contagem das áreas pode apresentar erros. Porque teve caso da espessura de torta que não foi removida ser muito menor do que a camada de torta residual, a camada de pó que fica depositada no tecido após a remoção. Isso pode levar a uma confusão na marcação das áreas.

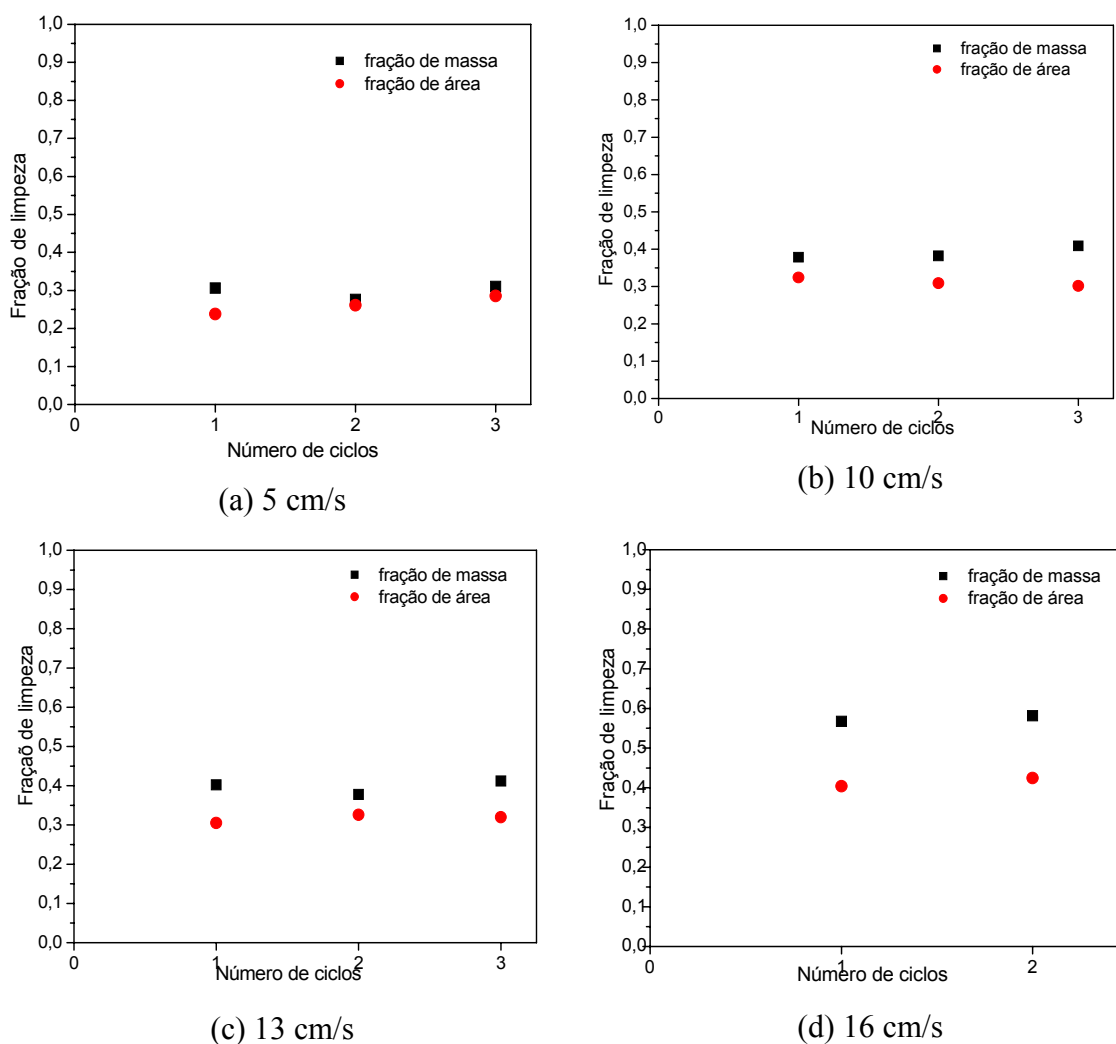


Figura 4.27: Comparação entre as frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e diferentes velocidades de limpeza.

No entanto, pôde-se constatar, que apesar dos possíveis erros, que ambas as frações apresentaram comportamentos aproximadamente semelhantes. Verifica-se na Figura 4.27, para a velocidade de limpeza de 5 cm/s, os valores das frações de massa e

de área removida, a partir do segundo ciclo, apresentaram valores muito próximos. Já para as velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, os valores das frações de massa e de área removida se distanciaram, com o aumento da velocidade de limpeza. Esse distanciamento pode ter sido causado pela baixa espessura da torta de filtração, como também, como foi visto no item 4.9 para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, pelo maior número de pedaços removidos, dificultando a marcação das áreas removidas.

Apesar de terem sido analisados apenas os três primeiros ciclos para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 13 cm/s e os dois primeiros ciclos para a velocidade de limpeza de 16 cm/s, do distanciamento das duas curvas, o comportamento apresentado pelas curvas foi o mesmo, mostrando que a metodologia utilizada na marcação das áreas removidas apresentou resultados bastante satisfatórios.

As Figuras 4.28 e 4.29 mostram o comportamento das frações de limpeza para a perda de carga máxima de 2939 e 3919 Pa, respectivamente.

Verifica-se através da Figura 4.28, que para uma velocidade de limpeza de 5 cm/s, ambas as frações apresentaram comportamentos semelhantes. Além disso, apesar do aumento da perda de carga máxima, de 1960 Pa para 2939 Pa, isto não refletiu no aumento das frações de limpeza, pois tanto para a perda de carga máxima de 1960 Pa quanto para a perda de carga máxima de 2939 Pa, as frações de massa e de área removida apresentaram valores em torno de 0,3. Já para as velocidades de limpeza de 10, 13 e 16 cm/s, as frações de limpeza apresentam comportamentos semelhantes a partir do terceiro ciclo. O fato da fração de área ter apresentado maior valor do que a fração de massa, nos dois primeiros ciclos, para a velocidade de limpeza de 10 cm/s, pode ter sido devido a dificuldade de marcação das áreas removidas.

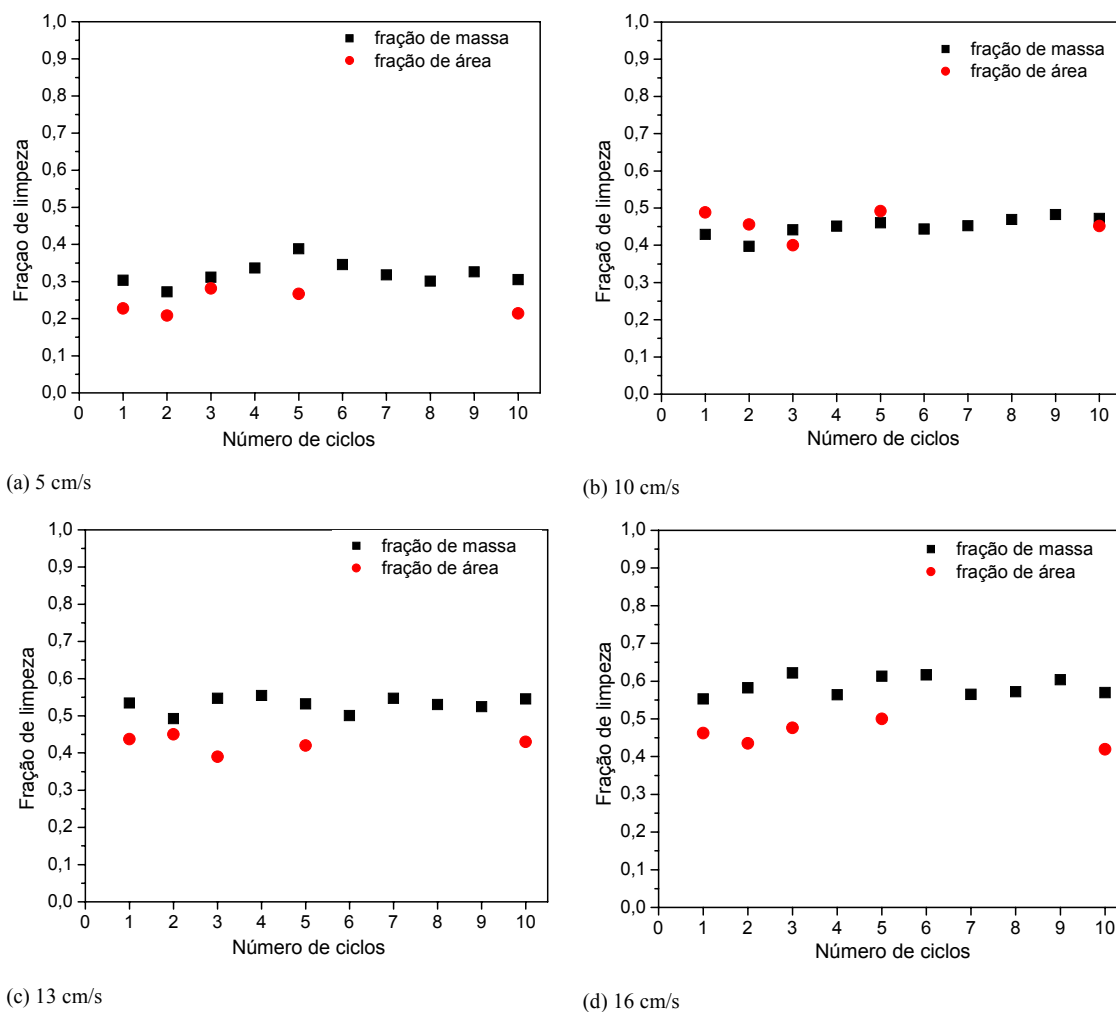
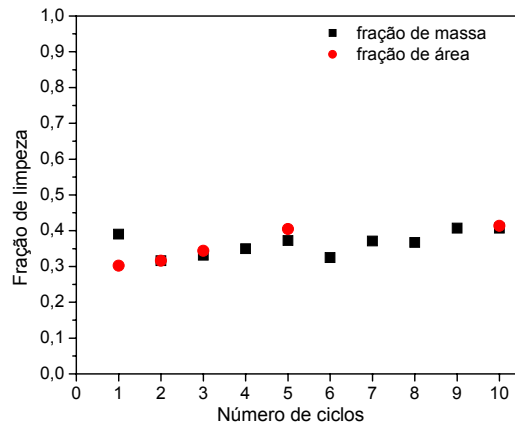


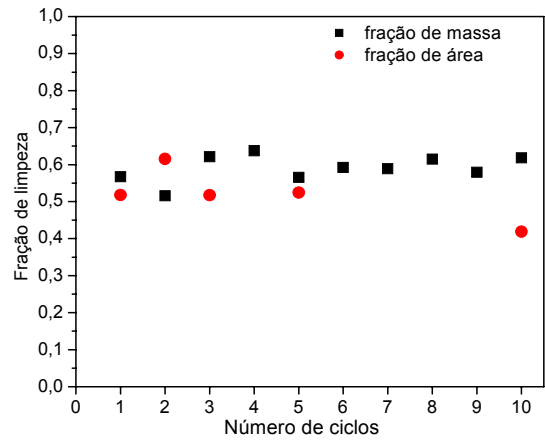
Figura 4.28: Comparação entre as frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e diferentes velocidades de limpeza.

A análise das curvas da Figura 4.29, para a perda de carga máxima de 3919 Pa, mostra que os valores, tanto da fração de massa removida quanto da fração de área removida, estão bem próximos, exceto para o décimo ciclo de filtração, onde foram maiores as dificuldades de se analisar as áreas removidas.

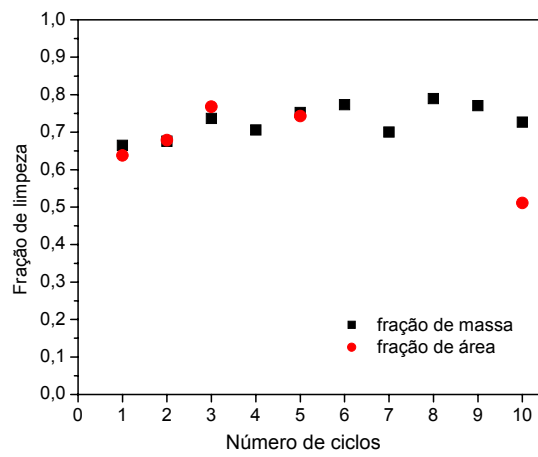
A facilidade de se identificar as áreas removidas das tortas mais espessas, devido a maior facilidade na remoção da torta, fez certamente com que ambas as frações de limpeza apresentassem valores próximos. Isso mais uma vez vem comprovar a eficácia do método proposto neste trabalho de quantificar a limpeza por blocos.



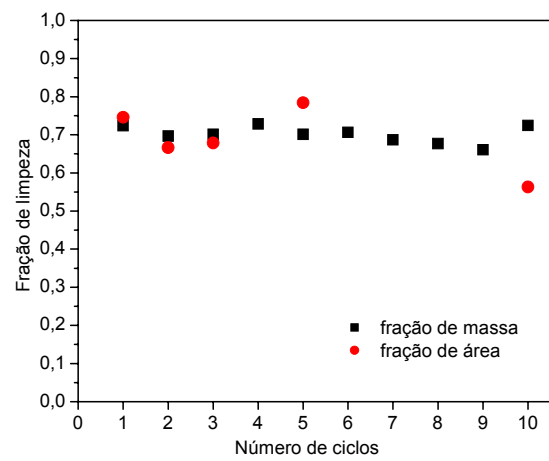
(a) 5 cm/s



(b) 10 cm/s



(c) 13 cm/s



(d) 16 cm/s

Figura 4.29: Comparação entre as frações de limpeza, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa diferentes velocidades de limpeza.

## 5. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho permitem apresentar as seguintes conclusões:

- Tanto a massa retida quanto a massa removida tiveram comportamento aproximadamente constante com o número de ciclos.
- A massa retida apresentou, com o aumento da velocidade de limpeza, uma menor variação de massa com o aumento da espessura da torta.
- A massa removida apresentou um comportamento linear com o aumento da perda de carga máxima, indiferente da velocidade de limpeza utilizada.
- A eficiência de limpeza aumentou com o aumento da perda de carga máxima, indiferente da velocidade de limpeza.
- Com o aumento da espessura da torta de filtração, a eficiência de limpeza se tornou constante a partir da velocidade de limpeza de 13 cm/s.
- A remoção foi mais fácil para tortas de maior espessura.
- Em relação ao condicionamento do meio filtrante, somente a massa retida não justificou o comportamento apresentado pela perda de carga residual.
- A área total removida apresentou, para altos valores de perda de carga máxima, tendência de se tornar constante com o número de ciclos, para todos os ciclos analisados.
- A área total removida não apresentou um comportamento definido com o decorrer do número de ciclos.



- Observou-se um aumento do tamanho dos pedaços removidos com o aumento da perda de carga máxima.
- A maior porcentagem dos pedaços removidos foi para pedaços removidos que tiveram seus tamanhos de área removida entre 0,01 e 0,1 cm<sup>2</sup>.
- A quantidade de pedaços removidos de tamanho pequeno aumenta com o aumento da velocidade de limpeza para baixos valores de perda de carga máxima.
- A quantidade de pedaços removidos de tamanho médio e grande diminuiu com o aumento da velocidade de limpeza para baixos valores de perda de carga máxima.
- A distribuição de tamanho dos pedaços removidos mostrou íntima relação com a perda de carga residual.
- Para todas as condições experimentais, houve um aumento do número de pedaços removidos com o número de ciclos.
- A fração de massa removida apresentou maiores valores comparada com a fração de área removida.
- Com o aumento da perda de carga máxima, as frações de massa e de área removida tenderam a apresentar valores próximos entre si.
- O método proposto de quantificação das áreas removidas apresentou resultados bastante satisfatórios.

## *6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS POSTERIORES*

Com base nos resultados apresentados e tendo em vista que o assunto remoção por blocos é, principalmente no âmbito quantitativo, ainda muito escasso, uma série de aspectos mereceriam ser estudados, tais como:

- Utilizar outros meios filtrantes existentes no laboratório de controle ambiental e que já foram caracterizados.
- Utilizar diferentes materiais pulverulentos, principalmente materiais provenientes de processos industriais.
- Construir um possível modelo que represente as condições reais de operação que foram investigadas.
- Utilizar modelos da literatura que tratam da limpeza por blocos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGUIAR, M.L. Filtração de ar em filtros de tecido. São Carlos, SP, UFSCar, 1991. (Dissertação).
- [2] AGUIAR, M.L. Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada. São Carlos, SP, UFSCar, 1995. (Tese).
- [3] BILLINGS, C.E.; WILDER, J. Handbook of fabric filter technology – Fabric filter systems study. Volume I. GCA Corporation, Bedford, Massachusetts December 1970.
- [4] CALLÉ, S.; BÉMER, D.; THOMAS, D.; CONTAL, P.; LECLERC, D. Changes in the Performances of Filter Media During Clogging and Cleaning Cycles. *Ann Occup. Hyg*, v.45, n.2, p. 115-121, 2001.
- [5] CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D. Description of the clogging and cleaning cycles of filter media. *Powder Technology* 123 (2002a) p. 40-52.
- [6] 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* 128 (2002b) p. 213-217.
- [7] 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.
- [8] DITTLER, A.; FERER, M.V.; MATHUR, P.; DJURANOVIC, G.K.; SMITH, D.H. Patchy cleaning of rigid gas filters – transient regeneration phenomena comparison of modelling to experiment. *Powder Technology*. 124 (2002). p.55-66.

- [9] DITTLER, A.; KASPER, G. Patchy cleaning of rigid filter media – Experimental determination of transient regeneration phenomena. 1999.
- [10] DONOVAN, R.P.; Fabric Filtration for Combustion Sources. New York, Marcel Dekker Inc., 1985.
- [11] DULLIEN, F.A.L. Introduction to Industrial Gas Cleaning. Academic Press, Inc. 1989.
- [12] DUO, W.; KIRKBY, N.F.; SEVILLE, J.P.K.; CLIFT, R.; Patchy cleaning of rigid gas filters – I. A probabilistic model. *Chemical Engineering Science*, vol. 52, nº 1, pp 141 – 151, 1997.
- [13] DUO, W.; SEVILLE, J.P.K.; KIRKBY, BÜCHELE, H.; CHEUNG, C.K.; Patchy cleaning of rigid gas filters – II. Experiments and model validation. *Chemical Engineering Science*, vol. 52, nº 1, pp 153 – 164, 1997.
- [14] GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L.D. Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. Tradução: André Koch. 2ª edição – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.
- [15] HESKETH, H.E. Air Pollution Control: Traditional and Hazardous Pollutants. Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, Pennsylvania, 1996. p.205.
- [16] HINDS, W.C.; Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2<sup>nd</sup> edition. A Wiley Interscience Publication. p.182-201, 1999.
- [17] JEON, K; JUNG, Y. A Simulation study on the compression behavior of dust cakes. *Powder Technology* 141 (2004), p. 1 – 11.

- [18] KOCH, D.; SEVILLE,J.; CLIFT,R. Dust cake detachment from gas filters. Powder Technology . 86 (1996). p.22.
- [19] LORA, E.E.S. Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte / Electo Eduardo Silva Lora. 2ª edição – Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- [20] MARTINS,J.C. Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido/ Jaqueline Costa Martins. São Carlos: UFSCAR,2001. (dissertação)
- [21] MAUSCHITZ.G.; KOSCHUTNIG,W.; HÖFLINGER,W. The influence of filter regeneration on the internal particle rearrangement of nonwovens for cleanable dust filters. 16 th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2004.
- [22] MCKENNA, J.D.; FURLONG, D.A. In: Air Polution Engineering Manual/Air & Waste Management Association. Editado por Anthony J. Buonicore , Wayne Davies, New York, 1992.
- [23] MOREIRA,F.L. Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros de manga. São Carlos, SP, UFSCAR,1998. (Dissertação).
- [24] MORRIS, K.; ALLEN, R.W.K. The Influence of Dust and Gas Properties on Cake Adhesion in Fabric Filters. Filtration & Separation, 1996, p. 339 – 343.
- [25] MYCOCK,J.C.; MCKENNA,J.D.; THEODORE,L. Handbook of Air Pollution Control Engineering and Technology, 1995.
- [26] PICH, J. “Gas filtration theory”. In: MATTESON, M.J. & ORR, C. Filtration: Principles and Practices. Second Edition. New York, 1987.

- [27] REMBOR, H.J.; KASPER, G. Fibrous Filters – Measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency. World Congress on Particle Technology 3, 1996.
- [28] RODRIGUES, A.C.M. Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão. São Carlos, SP, UFSCar, 2004. (Dissertação).
- [29] SEVILLE, J.P.K.; CHEUNG, W.; CLIFT, R. A Patchy-Cleaning Interpretation of Dust Cake Release from Non-woven Fabrics. Filtration & Separation. May/June 1989.
- [30] SEVILLE, J.P.K. Gas Cleaning in Demanding Applications. Editado por J.P.K. Seville. Blackie Academia & Professional. School of Chemical Engineering ; The University of Birmingham, UK, 1ª edição, 1997.
- [31] SILVA, C.R.N.; NEGRINI, V.S.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. Powder Technology .101(1999).p.165.
- [32] STÖCKLMAYER, Ch.; HOLLINGER, W. Simulation of the Long-Term Behaviour of Regenerable Dust Filters. Filtration & Separation. May 1998, page 373-377.
- [33] STRAUSS, W.; Industrial Gas Cleaning. 2<sup>nd</sup> ed. Pergamon Press, Oxford, 1975.
- [34] SVAROVSKY, L.; Handbook of Powder Technology: Solid-Gas Separation. Volume 3. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdã – Oxford – New York, 1981.
- [35] WAKEMAN, R.J. Filtration: equipment selection, modelling and process simulation/ R.J. Wakeman and E.S. Tarleton. 1ª edição .

- [36] VDI 3926 Part 1. "Testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media". Düsseldorf, Germany, (2003).

ANEXO A

*DADOS EXPERIMENTAIS*



**Ensaio 1**Tabela A1: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, Velocidade de limpeza de 5cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$ .

Tempo (s)	$\Delta P \text{ (cm H}_2\text{O)}$									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	0,4	2	2	2	2,8	3,8	1	4,4	1	4,2
30	0,6	11,2	12	11,2	14	16,4	15,4	15	15,6	15
60	1	17,4	18,4	16	18,4	19,4	19,4	18,8	19,6	19
90	2,8	21	21,4	19,6	22,2	22,8	22,2	22,4	22,2	22
120	4,6	23		22						
150	6,6									
180	9									
210	11									
240	12,6									
270	15,2									
300	17,6									
330	19,4									
360	21									
Peso inicial do filtro (g)	416,17	419,99	420,36	420,08	420,27	420,48	420,23	420,34	420,11	420,40
Filtro + torta (g)	421,62	421,96	421,87	422,12	422,23	422,22	421,94	421,68	421,72	421,85
Filtro após limpeza (g)	419,99	420,36	420,08	420,27	420,48	420,23	420,34	420,11	420,4	420,23
Papel limpo (g)	4,91	4,93	4,90	4,90	5,05	4,96	4,91	4,94	4,95	4,96
Papel + torta (g)	6,58	6,53	6,67	6,72	6,76	6,91	6,54	6,52	6,42	6,59

**Ensaio 2**Tabela A2: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 5cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ (cm H <sub>2</sub> O)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	0,6	2,8	2,6	2,6	3,4	3,4	3,8	3,8	5,2	4,4
30	1	10,6	11	11,2	-	14,4	16	16	16	15,2
60	2,2	17,4	16,8	16,8	18,8	19,2	21	20	19,2	19,2
90	5,2	22	22	18,4	20	21	24	21	21,4	-
120	7,6	23,4	24,8	21	20,8	23,4	26,2	-	23	20,4
150	10	24,8	26	22	23	25,4	28	23	25	23,6
180	13	26	27	23,2	24,4	27,4	30,6	25	27	-
210	15,4	27,4	28,6	25,6	25,4	28,8		27	28,8	26,8
240	17,2	28,4	30,6	27	26,8	30		28,6	30,4	27,4
270	19,4	30		27,8	28,4			30		28
300	21,6			29,6	30					30
330	23,2			30,4						
360	24,4									
390	26									
420	27,6									
450	28,6									
480	30									
Peso inicial do filtro (g)	414,52	419,75	419,72	419,73	419,90	419,43	419,29	419,23	419,42	419,22
Filtro + torta (g)	422,00	421,72	422,10	422,64	422,56	421,81	421,41	421,50	421,48	421,37
Filtro após limpeza (g)	419,75	419,72	419,73	419,90	419,43	419,29	419,23	419,42	419,22	419,30
Papel limpo (g)	5,03	5,03	5,04	5,04	5,03	5,03	5,03	5,00	5,01	5,01
Papel + torta (g)	7,30	6,99	7,40	7,77	8,15	7,55	7,22	7,10	7,28	7,10

**Ensaio 3:**Tabela A3: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 5cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$ .

Tempo (s)	$\Delta P \text{ ( cm H}_2\text{O )}$									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	0,6	2	2,4	3	2,8	3,2	3,4	3,4	3,4	5,8
30	0,8	11	13	15,2	19,6	20,4	16	18	18	18,6
60	2,6	21,4	22,6	24,2	25,8	26,6	23,6	22,2	23,4	23,4
90	5,8	26	9	29	30,4	30,6	27,8	26,4	27,8	26,6
120	8	29,8	31,6	31,4	32,4	31,2	30	30	29	30
150	11,2	32	34	35	35,2	34,4	32,2	32	33,2	33,8
180	14,8	35	37,2	36,6	37,2	36	34,2	34	35,4	35,8
210	16,2	36,4	38,2	38,4	38,8	38	36,4	36,2	38	37,2
240	21,2	38,4	39,6	40,6	40,8	40	38,4	37,6	38,8	39,6
270	24	39,6	42,2				38,8	39,4	41	42,8
300	26,6	42					41,4	40,4		
330	28,4									
360	30,2									
390	31,2									
420	32,8									
450	35,6									
480	36									
510	38									
540	38,2									
570	40,6									
Peso inicial do filtro (g)	415,00	420,84	421,42	421,32	421,23	421,06	421,00	421,20	421,12	420,56
Filtro + torta (g)	424,32	424,43	424,48	424,60	424,53	423,89	424,83	424,62	424,38	425,02
Filtro após limpeza (g)	420,84	421,42	421,32	421,23	421,06	421,00	421,20	421,12	420,56	420,94
Papel limpo (g)	5,06	5,10	5,11	5,10	5,06	5,10	5,10	5,09	5,09	5,08
Papel + torta (g)	8,70	8,08	8,25	8,46	8,61	7,99	8,75	8,62	8,89	9,16

**Ensaio 4**Tabela A4: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo10
0	0,2	1,2	1,2	1,4	1,6	2	2,4	2,2	2,2	2
20	0,2	7,4	8,6	5,6	8,8	8,4	12,4	9,2	10,6	11,2
40	0,4	12	13,2	8	13,6	12,6	16,8	13,2	14,4	14
60	1,6	14,4	15,4	12,4	16,4	14,8	18,4	15,2	16,4	15,6
80	3,2	17	16,6	14,6	18	16,6	20,2	18	18,4	17,4
100	5,2	17,6	17,8	16,4	19,2	18		19,2	20,2	19,2
120	7,4	19,6	19,6	18	20,4	18,6		20,8		20,8
140	8,2	20,4	21	19,6		20,2				
160	9,6			20,8						
180	11,6									
200	13,6									
220	15									
240	17									
260	18,6									
280	19,8									
300	21									
Peso inicial do filtro (g)	415,48	419,01	419,00	418,79	418,70	418,70	418,77	418,74	418,93	418,86
Filtro + torta (g)	421,16	421,11	421,01	420,83	420,35	420,46	420,34	421,16	420,56	420,40
Filtro após limpeza (g)	419,01	419,00	418,79	418,70	418,70	418,77	418,74	418,93	418,86	418,67
Papel limpo (g)	5,08	5,08	5,07	5,14	5,07	5,14	5,07	5,07	5,07	5,05
Papel + torta (g)	7,23	7,23	7,33	7,12	6,73	6,70	6,63	7,35	6,75	6,75

**Ensaio 5**Tabela A5: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ (cm H <sub>2</sub> O)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	0,2	1,4	1,6	1,6	1,8	2	2	2,2	2,4	2,4
30	0,6	8,8	9	10,6	10,2	14	12	11,6	14	8,8
60	1,8	14,6	15,4	15	14,6	17	16,6	16	18	10,4
90	3,0	19	18,8	18,6	18	19,6	19,6	18,8	21,2	14
120	4,8	22	22	21,6	20,6	23,2	22	22	23,4	16,6
150	7	24,4	23,6	24	23	26,4	25	24	25,6	18,4
180	8,8	26,2	26,8	26,4	25,8	28,6	27,6	26,4	26,8	22
210	10	28,6	28,4	28,6	28,2	30,4	31,4	29,2	28,8	23
240	10,6	30	29,8	31	29,6			30,8	31	25,6
270	12,6		30,2		31,6					27,4
300	14									29
330	15,4									31
360	16,6									
390	18,8									
420	20,2									
450	22									
480	24									
510	26									
540	27,6									
570	28									
600	30									
Peso inicial do filtro (g)	415,73	419,47	419,79	419,57	419,41	419,08	419,22	419,19	419,26	418,99
Filtro + torta (g)	422,83	422,9	423,13	423,04	422,97	422,59	422,69	422,97	422,75	422,96
Filtro após limpeza (g)	419,47	419,79	419,57	419,41	419,08	419,22	419,19	419,26	418,99	419,12
Papel limpo (g)	5,07	5,05	5,03	5,04	5,03	5,02	5,04	5,03	5,05	5,05
Papel + torta (g)	8,43	8,19	8,62	8,67	8,70	8,39	8,52	8,77	8,79	8,81

**Ensaio 6:**Tabela A6: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo10
0	0,4	1,4	1,4	2	3	3	2,6	3,6	3	3,6
30	0,8	10,6	11	14	12,6	14	12	15,4	13,2	-
60	2,8	15	16,6	19,6	18,4	20	17,6	19	17,8	18,4
90	6	18,8	21,8	24,4	23,4	26,2	22,4	22,4	21,6	22,2
120	8,8	23	24,4	27	27,4	29,6	25,4	26,8	25,4	25
150	11,6	28,6	28	30,8	30,4	32,6	28,4	30,8	29,2	29
180	15	31	33	34,6	33,2	34,8	30,8	32,8	31,2	31
210	18,4	33,6	35	36,2	37	37	33,2	35,4	33,6	32,6
240	20	36	37,6	38	41,2	40	36	38,6	36,8	35
270	22,6	36,8	40,4	39,6			38	42	39,8	37,6
300	25,4	39,6		43,6			40		41,6	39,6
330	28,6	41,4								41,8
360	30									
390	32									
420	34									
450	37,4									
480	39,6									
510	40									
Peso inicial do filtro (g)	414,82	418,85	418,59	418,28	418,20	418,46	418,27	418,31	418,09	418,31
Filtro + torta (g)	424,07	424,59	423,96	424,23	43,41	423,30	423,40	423,26	423,26	423,07
Filtro após limpeza (g)	418,85	418,59	418,28	418,20	418,46	418,27	418,31	418,09	418,31	417,93
Papel limpo (g)	5,06	5,04	5,05	5,06	5,06	5,05	5,04	5,02	5,06	5,04
Papel + torta (g)	10,31	10,08	10,73	11,06	9,92	10,07	10,09	10,21	9,95	10,14

**Ensaio 7:**Tabela A7: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$ .

Tempo (s)	$\Delta P \text{ ( cm H}_2\text{O )}$									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo10
0	0,4	1,2	1,6	1,4	1,8	1,6	2	2	2	2,2
20	0,6	7,2	9,4	7,4	4,0	8,8	8	9	8,6	10
40	1,6	12	13	11	5,2	12	10,6	11,6	9,8	12,4
60	3,0	13	15,6	13,2	9,4	13,6	13,2	-	12	13,6
80	4,4	16	17,2	14,8	12,8	15	15,2	14	13,6	15,6
100	5,0	17,4	18,6	16	15	16,6	17	15,2	15,8	17
120	6,4	18,8	20,8	16,6	16	18,4	18,8	16	16,8	18,4
140	7,6	19,6		18,2	17,2	19,4	19,6	16,6	17	20
160	9,0	21,2		19,2	18,4	20,4	21	18,2	17,4	
180	10,4			20,2	19,2			19,6	17,4	
200	11,2				20			20,6	17,8	
220	12,8								-	
240	14,6								21	
260	15,8									
280	17,4									
300	18,6									
320	19,6									
340	21,2									
Peso inicial do filtro (g)	415,69	418,53	418,84	418,58	418,57	418,49	418,56	418,53	418,53	418,41
Filtro + torta (g)	420,51	420,72	420,64	420,47	420,36	420,45	420,45	420,31	420,29	419,98
Filtro após limpeza (g)	418,53	418,84	418,58	418,57	418,49	418,56	418,53	418,53	418,41	418,36
Papel limpo (g)	4,89	4,90	4,91	4,91	4,92	4,92	4,95	4,92	4,93	4,95
Papel + torta (g)	6,83	6,80	6,95	6,78	6,76	6,79	6,79	6,70	6,77	6,78

**Ensaio 8:**Tabela A8: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo10
0	0,6	1,4	2,0	2,4	2,2	2,2	4,0	2,4	2,4	2,4
30	1,0	8,0	7,4	11,4	11,4	8,6	13,6	8,4	12,4	10,4
60	2,6	15,2	14	16,6	15	13,8	16,6	9,2	16	13,6
90	4,4	19	18	20,4	17,6	16,4	19,4	10,6	18,2	16,6
120	5,8	21,2	21,4	24	20,6	20	21,8	15	21,2	19
150	8,2	23	23	25,6	23,2	22	24,4	18	22,8	21
180	10,4	25,6	25,2	28,2	25,6	24	26	19,6	24,4	23
210	12	27	27,6	30,8	27,6	25,8	28	22	25,8	26
240	13,8	27	29,4		30	28	29,6	25,2	28	27,2
270	16,4	29,2	30			30	30,8	27	30,2	28,8
300	18,6	30						28,6		30,4
330	20							30		
360	20,6									
390	22,8									
420	24									
450	25,2									
480	27,6									
510	29									
540	30,4									
Peso inicial do filtro (g)	415,24	418,70	418,93	418,61	418,56	418,37	418,43	418,37	418,34	418,26
Filtro + torta (g)	422,05	422,45	422,52	422,76	421,88	421,67	422,15	421,86	421,63	421,73
Filtro após limpeza (g)	418,70	418,93	418,61	418,56	418,37	418,43	418,37	418,34	418,26	418,21
Papel limpo (g)	5,03	5,04	5,04	5,05	5,03	5,06	5,06	5,06	5,03	5,04
Papel + torta (g)	8,67	8,59	9,02	9,22	8,56	8,28	8,84	8,57	8,38	8,58



**Ensaio 9:**Tabela A9: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	0,8	1,6	1,6	1,8	2,2	2,4	2,4	3,0	3,8	2,6
30	1,0	6,4	8,6	7,4	8,0	8,0	7,0	9,2	9,0	-
60	1,6	9,4	13,2	9,6	12,4	10	-	13	11,6	9,6
90	3,4	11,4	15,4	-	14,4	11,6	9	15,4	-	-
120	5,6	13,6	18	10,4	16,6	14	12	17,4	16	14
150	7,6	16	20,6	12	18	16	14,2	19,6	18,4	-
180	10	17,6	23	14,8	20,6	18	16	21,2	20,4	18,6
210	11,8	18	25,4	17,4	22	20,6	18,4	23	22,4	21,4
240	14	19,6	27	19,6	23,4	22,4	20,2	24,4	24	23,2
270	16,2	21,2	28,4	21,2	25,4	23,4	23	25,8	26,6	-
300	18,2	23,4	31,4	23	27,2	25	24,4	28	28	26,2
330	20,6	26	32,8	24,6	29,4	27,4	27	30	29	-
360	22,2	27	34,4	25,6	-	28,8	27,4	31,2	30,8	30,4
390	23,4	-	35	27	30,6	30,2	30	33,2	32,8	31,4
420	24,8	29	37	28,2	32,2	31,8	-	34,2	34,6	32,4
450	26,8	-	38,4	-	-	33	-	35	36	-
480	28	31	40	30	36	34,4	35	37	37	37
510	29,6	33		-	37,4	35,6	37,4	38,4	38,8	-
540	31,2	-		32	37,8	37	38,2	39,2	40,4	40
570	32,6	34,6		34,6	40	38,6	40	40,8		
600	34	35,8		37		39,6				
630	36	-		38		40,4				
660	37	37		40,4						
690	38,4	39,2								
720	39,4	40								
750	41									
Peso inicial do filtro (g)	415,24	418,35	418,03	417,67	418,01	417,52	417,34	417,77	417,47	417,34
Filtro + torta (g)	424,58	423,85	424,51	424,55	424,53	424,68	423,81	425,64	424,41	424,54
Filtro após limpeza (g)	418,35	418,03	417,67	418,01	417,52	417,34	417,77	417,47	417,34	417,78
Papel limpo (g)	5,15	5,10	4,80	4,79	4,79	4,80	4,80	4,78	4,81	4,82
Papel + torta (g)	11,36	10,92	11,63	11,36	11,78	12,10	10,80	12,99	11,88	11,58

**Ensaio 10:**Tabela A10: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 1960$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo10
0	0,6	1,2	1,2	1,6	1,4	1,6	1,4	2,4	1,6	2,0
30	0,8	7,6	6,4	10	5,4	8,0	6,8	10	7,4	8,6
60	1,6	11,4	10,2	13	9,2	11	10	13,2	10,4	11,6
90	2,6	14	12,6	15	11,4	14,6	13,4	13,6	12	13,2
120	4,2	16	14,2	17,6	13,2	16,8	15,6	15	14	15,2
150	5,8	19	16	19,6	15,8	18	18,2	16	-	17,2
180	7,2	20,8	18	20,8	18	19,6	20	17,4	17,8	19,6
210	7,8		20		20	20,8		18,8	20,4	21,8
240	8,8							20,6		
270	9,6									
300	12									
330	13,4									
360	14									
390	15,8									
420	16,4									
450	17									
480	18,8									
510	20									
Peso inicial do filtro (g)	415,08	417,50	417,44	417,40	417,38	417,48	417,33	417,91	417,37	417,40
Filtro + torta (g)	420,6	420,72	420,51	420,50	420,28	420,55	420,42	420,77	420,47	420,89
Filtro após limpeza (g)	417,50	417,44	417,40	417,38	417,48	417,33	417,91	417,37	417,40	417,30
Papel limpo (g)	5,08	5,07	5,06	5,05	5,05	5,04	5,05	5,03	5,05	5,06
Papel + torta (g)	8,21	8,35	8,15	8,16	7,78	8,25	7,54	8,47	8,11	8,70

**Ensaio 11:**Tabela A11: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 2939$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo10
0	0,8	1,4	2,2	2,4	2,4	2,4	2	2	2,2	2,2
30	1,2	6,0	-	10,4	10	9,0	10	10	7,2	9,4
60	2,8	9,4	7,2	-	13,6	12,6	12,6	13	12	13
90	4,4	13	-	14,8	15,4	15,2	15,6	16	15,2	15,2
120	6,4	16,4	14,8	-	-	17,4	17,8	17,6	17,4	16,8
150	8,0	20,4	-	19,6	19	19,8	20,6	20	19,6	19
180	10	22,6	18,6	-	20,6	21,4	22,6	22,2	21,4	20,6
210	12	25	-	22,6	-	23,6	23,6	23,8	23,2	22,4
240	-	26,4	22,4	-	23,4	25,6	25,8	25,4	25	24,6
270	14	28,6	-	25,6	25	27,2	27	26,4	26,6	25,4
300	15,4	30	24,8	-	26,4	8,8	28	28,4	28	27,2
330	-	-	-	28,4	27,6	30,6	30	30	29,6	29
360	17,6	-	27,2	30	29	-	-	-	30,8	30
390	-	-	-	-	30	-	-	-	-	-
420	21	-	30	-	-	-	-	-	-	-
450	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
480	23,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
510	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
540	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
570	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-
600	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Peso inicial do filtro (g)	415,89	419,23	419,29	418,88	418,90	418,92	418,66	418,88	418,78	418,75
Filtro + torta (g)	423,27	423,96	423,85	422,72	423,70	423,11	422,76	422,69	423,08	422,63
Filtro após limpeza (g)	419,23	419,29	418,88	418,90	418,92	418,66	418,88	418,78	418,75	418,75
Papel limpo (g)	4,84	4,83	4,85	4,84	4,88	4,89	4,90	4,84	4,80	4,85
Papel + torta (g)	8,92	9,53	9,80	8,69	9,67	9,34	8,78	8,73	9,14	8,69

**Ensaio 12:**Tabela A12: Dados obtidos do ensaio de filtração com velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16cm/s e  $\Delta P_{\text{máx}} = 3919$  Pa.

Tempo (s)	$\Delta P$ ( cm H <sub>2</sub> O )									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	0,8	1,4	1,8	2,2	2,0	2,2	2,2	2,2	2,6	2,8
30	1,0	-	8,0	9,0	8,6	9,4	9,2	8,8	9,0	10
60	2,0	9,2	12,6	13,2	11,6	12,2	12,6	11,6	12	13
90	4,0	12,6	15,6	16	14	14	13,8	14,4	15	15,4
120	5,8	16	17,6	19,4	16,6	16,6	16	16,6	17,2	17
150	7,8	18,8	20	21,4	18,6	19	18,2	18,8	19	19
180	10	21	22,8	23,6	21	20,6	20,2	21	21,8	21,4
210	12,6	23,6	24,4	26,4	23,6	23,2	22,8	23	23,6	23,4
240	14,2	26	27	28,8	25,4	26	24,6	25,6	25,2	25
270	16,6	28	28,2	31	27,2	28	26	27,4	26,6	26,6
300	18,8	29,8	30,6	33	29,2	29,6	28	29	29	29
330	20,4	32,4	31,8	34,2	31	32,2	29,4	31	30,2	30,4
360	22,4	34	33,4	36	32,6	33,4	31,2	33	32	32,4
390	24,4	35,6	35,4	38	34,4	35,4	33,4	34,8	33,6	33,8
420	26	37,8	36,8	40	36	36,8	35	36	35,2	35
450	27,8	39	38,0		37,8	38,8	36	37,4	36,6	36
480	29	40	39,2		39	40,6	37,4	38,6	38	37,4
510	31		41		40,6		38,6	40,2	40	39,2
540	32,6						40,4			40,4
570	34									
600	35,2									
630	37									
660	39									
690	-									
720	40,8									
Peso inicial do filtro (g)	415,36	417,98	418,06	418,11	417,92	418,00	417,82	417,93	417,91	417,96
Filtro + torta (g)	425,07	424,16	424,66	424,80	424,03	423,70	423,63	423,38	423,05	424,10
Filtro após limpeza (g)	417,98	418,06	418,11	417,92	418,00	417,82	417,93	417,91	417,96	417,79
Papel limpo (g)	5,11	5,09	5,09	5,07	5,06	5,06	5,07	5,06	5,05	5,08
Papel + torta (g)	12,14	11,22	11,61	11,95	11,14	10,95	10,75	10,49	10,13	11,41



## ANEXO B

Valores das umidades durante a realização dos experimentos

Tabela B1: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 5 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.

ciclo	$\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$
1	14,8	13,7	10
2	16,6	15,5	9,8
3	16,6	13,2	10,4
4	20	13,3	11,7
5	20	10,1	13,6
6	20,6	12,3	9,8
7	21	9,4	11,7
8	18,5	10,4	9
9	19,8	10	10,5
10	20,9	7,8	12,9

Tabela B2: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e diferentes perdas de carga máxima

ciclo	$\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$
1	15	9,5	11,9
2	18,2	10,2	10,7
3	14,8	10,5	11
4	16,1	10,1	11,7
5	14,4	8	9,9
6	12,6	10,4	9,5
7	12,4	10	12,4
8	11,4	12,5	8,2
9	11,2	9,1	7,9
10	10,1	8,4	8

Tabela B3: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e diferentes perdas de carga máxima

ciclo	$\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$
1	11	10,6	13,2
2	14,3	11	9,9
3	10,7	11,9	11,8
4	12,6	9,7	10,1
5	10	9,9	10,5
6	11,3	9,8	11
7	11,4	9,4	10,5
8	11,2	9	10,3
9	10,7	8,1	10
10	10	6,9	10

Tabela B4: Valores das umidades (%R) durante a condução dos experimentos, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e diferentes perdas de carga máxima

ciclo	$\Delta P_{\text{máx}} = 1960 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 2939 \text{ Pa}$	$\Delta P_{\text{máx}} = 3919 \text{ Pa}$
1	12,5	9	12
2	15	10,5	12,5
3	19	13,6	13
4	15	12,5	12,6
5	11,5	12	11
6	12,6	11,6	11,3
7	12,4	10,7	12,2
8	9,6	9	13
9	9,5	9,5	12,5
10	10	10	12



ANEXO C

RESULTADOS DAS DISTRIBUIÇÕES DE TAMANHO DOS  
PEDAÇOS DE TORTA REMOVIDOS.

Tabela C1: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
5	1	53,5	23,78	0,015	40,92	1,19
				0,04	24,83	1,92
				0,075	17,24	2,5
				0,15	10,80	3,13
				0,35	4,14	2,8
				0,75	0,69	1,0
				1,5	1,15	3,33
				19,93	0,23	8,86
	2	58,79	26,13	0,015	28,57	0,95
				0,04	15,09	1,33
				0,075	27,56	4,57
				0,15	18,51	6,13
				0,35	7,05	5,44
				0,75	1,81	3,0
				2,0	1,21	5,33
				4,86	0,20	2,16
	3	64,19	28,53	0,015	23,95	0,69
				0,04	14,88	1,14
				0,075	24,19	3,47
				0,15	17,21	4,93
				0,35	14,42	9,64
				0,75	3,49	5,0
				1,5	1,63	4,67
				2,79	0,23	1,22

Tabela C2: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
5	1	51,18	22,74	0,025	23,08	0,23
				0,075	39,56	1,2
				0,3	25,27	3,07
				0,75	5,49	1,67
				1,5	2,20	1,33
				3,5	2,20	3,11
				8,05	1,1	3,58
				20,12	1,1	8,94
	2	46,88	20,83	0,025	25,31	0,45
				0,075	20,37	1,1
				0,15	22,22	2,4
				0,35	18,52	4,67
				0,75	8,02	4,33
				1,5	3,70	4,0
				3,0	1,23	2,67
				5,41	0,62	2,41
	3	63,23	28,10	0,025	24,44	0,37
				0,075	18,52	0,83
				0,15	18,52	1,67
				0,35	17,78	3,73
				0,75	7,41	3,33
				1,5	7,41	6,67
				3,5	5,18	10,89
				5,52	0,74	2,45
	5	60,1	26,71	0,025	13,64	0,2
				0,075	29,54	1,3
				0,15	33,33	2,93
				0,35	7,57	1,56
				0,75	11,36	5,0
				2,5	3,03	4,44
7,95				0,76	3,53	
17,84				0,76	7,93	
10	48,11	21,38	0,025	40,42	1,94	
			0,075	27,71	4,0	
			0,15	15,70	4,53	
			0,35	14,32	9,64	
			0,75	1,39	2,0	
			1,5	0,46	1,33	

Tabela C3: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
5	1	68	30,2	0,05	71,42	0,222
				2,05	14,28	4,552
				58,9	7,14	9,02
				38,6	7,14	17,16
	2	71,1	31,6	0,025	31,17	0,26
				0,075	22,08	0,57
				0,55	35,06	6,6
				2,5	5,19	4,4
				7	5,19	12,44
				28,81	1,30	12,80
	3	77,42	34,41	0,025	33,33	0,39
				0,075	19,05	0,67
				0,55	39,05	10,02
				2,5	5,71	6,66
				7,96	0,95	3,54
				17,56	0,95	7,81
				25,36	0,95	11,27
	5	91,1	40,48	0,025	10,45	0,15
				0,075	24,63	1,1
				0,55	53,73	17,6
				2	7,46	8,89
				4,5	2,98	8,0
				33,74	0,75	14,99
	10	93,02	41,34	0,025	17,03	0,34
				0,075	18,68	1,13
				0,55	56,59	25,18
				2,0	5,49	8,89
				4,5	1,1	4,0
7,25				0,55	3,23	
20,69				0,55	9,2	

Tabela C4: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
10	1	72,95	32,42	0,01	19,44	0,58
				0,025	25,374	1,9
				0,04	25,67	3,07
				0,075	17,06	3,83
				0,15	7,42	3,33
				0,35	2,37	2,49
				0,75	0,89	2
				1,75	1,18	6,22
				3,5	0,44	4,67
				16,71	0,15	7,42
	2	69,52	30,89	0,01	12,61	0,39
				0,025	12,61	0,98
				0,04	26,79	3,32
				0,075	26,07	6,06
				0,15	13,32	6,2
				0,35	6,59	7,15
				0,75	1,43	3,33
				1,75	0,43	2,33
				8,48	0,14	3,77
	3	67,91	30,18	0,01	14,80	0,51
				0,025	20,08	1,73
				0,04	21,11	2,92
				0,075	26,9	6,97
				0,15	9,78	5,07
				0,35	5,79	7
				0,75	0,77	2
				1,75	0,39	2,33
3,5				0,39	4,67	

Tabela C5: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
10	1	109,85	48,82	0,01	1,02	0,013
				0,025	5,48	0,18
				0,04	29,11	1,51
				0,075	45,55	4,43
				0,15	13,36	2,6
				0,25	4,11	1,33
				0,4	0	0
				0,75	1,03	1
				86,53	0,34	38,46
	2	102,59	45,60	0,01	8,63	0,17
				0,025	9,07	0,45
				0,04	15,26	1,23
				0,075	23,23	3,5
				0,15	21,02	6,33
				0,25	8,19	4,11
				0,4	7,52	6,04
				0,75	4,42	6,67
				1,5	2,21	6,67
				2,26	0,22	1,00
				24,16	0,22	10,74
	3	90	40	0,01	9,1	0,17
				0,025	7,46	0,36
				0,04	14,68	1,12
				0,075	27,97	4
				0,15	18,88	5,4
				0,25	8,39	4
				0,4	7,46	5,69
				0,75	3,96	5,67
				1,5	1,16	3,33
				2,5	0,47	2,22
5,08				0,23	2,26	
16,78				0,23	7,46	
4				0,47	3,56	
15,66				0,23	6,96	
1,5	1,16	4,67				
2,5	0,33	2,22				
11,70	0,17	5,20				

Continua

Tabela C5: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s. (cont.).

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
10	5	110,64	49,17	0,01	1,86	0,036
				0,025	3,26	0,15
				0,04	12,59	0,96
				0,075	28,21	4,03
				0,15	24,94	7,13
				0,25	9,56	4,56
				0,4	11,89	9,07
				0,75	4,89	7
				1,5	1,4	4
				2,5	0,7	3,33
				4	0,47	3,56
				15,66	0,23	6,96
	10	101,64	45,17	0,01	12,46	0,33
				0,025	10,46	0,7
				0,04	13,79	1,47
				0,075	22,59	4,53
				0,15	20,43	8,2
				0,25	8,14	5,44
				0,4	6,81	7,29
				0,75	3,65	7,33
1,5	1,16	4,67				
2,5	0,33	2,22				
11,70	0,17	5,20				

Tabela C6: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
10	1	116,57	51,81	0,03	12,27	0,27
				0,075	39,26	2,13
				0,15	28,22	3,07
				0,35	12,88	3,27
				0,75	3,68	2
				1,5	2,45	2,67
				3,8	0,61	1,69
				85,13	0,61	37,83
	2	138,48	61,55	0,035	16,67	0,23
				0,075	18,89	0,57
				0,15	17,78	1,07
				0,35	15,56	2,18
				0,75	10	3
				1,3	4,44	2,31
				2,5	4,44	4,44
				4,5	2,22	4
				5,5	2,22	4,89
				7	3,33	9,33
				10	3,33	13,33
				35,62	1,11	15,83
	3	116,4	51,73	0,02	13,1	0,194
				0,035	13,69	0,36
				0,075	19,64	1,1
				0,15	26,19	2,93
				0,35	16,67	4,35
				0,75	7,74	4,33
				1,5	1,194	1,33
				2,2	1,194	1,95
	5	118,04	52,46	81,12	0,594	36,05
				0,02	2,9	0,053
				0,04	7,25	0,27
				0,075	18,84	1,3
				0,15	23,67	3,27
				0,25	17,87	4,11
				0,35	14,49	4,67
				0,75	8,69	6
1,3				2,41	2,89	
2,1				0,97	1,87	
4				0,48	1,78	
6				0,97	5,33	
9,5	0,48	4,22				
19	0,97	16,89				

Continua



Tabela C6: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 10 cm/s. (cont.).

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
10	10	94,30	41,91	0,025	8,90	0,57
				0,04	15,36	1,56
				0,075	26,70	5,1
				0,15	24,43	9,33
				0,25	12,04	7,67
				0,35	7,50	6,69
				0,75	4,01	7,67
				1,1	0,70	1,95
2,5	0,35	2,22				

Tabela C7: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida	
13	1	68,61	30,49	0,01	33,07	1,33	
				0,025	21,44	2,38	
				0,04	25,55	4,53	
				0,075	12,42	4,13	
				0,15	3,91	2,6	
				0,35	1,60	2,49	
				0,75	1,50	5	
				1,75	0,40	3,11	
				15,85	0,10	7,05	
			73,31	32,58	0,01	19,9	1,02
					0,025	16,26	2,09
					0,04	24,48	5,03
					0,075	25	9,63
					0,15	10,121	7,8
					0,25	2,25	2,89
					0,4	1,12	2,31
					0,75	0,69	2,67
					1,5	0,17	1,33
	3		71,99	32	0,01	19,72	1,00
					0,025	19,46	2,49
					0,04	24,33	4,98
					0,075	23,63	9,07
					0,15	8,95	6,87
					0,35	3,13	5,6
					0,75	0,43	1,67
					1,5	0,26	2
					3,1	0,087	1,37

Tabela C8: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
13	1	98,37	43,72	0,01	6,10	0,10
				0,025	9,55	0,4
				0,04	30,77	2,06
				0,075	35,28	4,43
				0,15	12,47	3,13
				0,25	2,65	1,11
				0,4	1,061	0,71
				0,75	0,26	0,33
				1,5	0,26	0,67
				7,8	0,80	10,4
				10,44	0,26	4,64
				15,58	0,26	6,93
	22,78	0,26	10,13			
	2	101,24	45	0,01	3,27	0,058
				0,025	6,80	0,3
				0,04	19,39	1,37
				0,075	22,42	2,97
				0,15	20,40	5,4
				0,25	8,82	3,89
				0,4	9,07	6,4
				0,75	5,79	7,67
				1,5	3,53	9,33
				2,10	0,25	0,93
				20,63	0,25	9,17
				3	87,76	39
	0,025	7,25	0,37			
	0,04	18,68	1,51			
	0,075	27,03	4,1			
	0,15	19,34	5,87			
	0,25	8,13	4,11			
	0,4	5,49	4,44			
	0,75	5,27	8			
	1,5	1,10	3,33			
2,00	0,22	0,89				
18,58	0,22	8,26				

Continua

Tabela C8: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s. (cont.).

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
13	5	94,49	42	0,01	2,04	0,05
				0,025	8,90	0,53
				0,04	14,29	1,37
				0,075	27,27	4,9
				0,15	27,64	9,93
				0,25	8,53	5,11
				0,4	5,56	5,33
				0,75	4,45	8
				1,5	0,74	2,67
				3	0,37	2,67
	8,40	0,18	3,73			
	10	96,70	42,98	0,01	7,84	0,23
				0,025	8,0	0,59
				0,04	15,84	1,87
				0,075	29,56	6,53
				0,15	20,66	9,13
				0,25	8,75	6,44
				0,4	4,52	5,33
				0,75	3,77	8,33
				1,5	0,75	3,33
2,10				0,15	0,93	
6,33	0,15	2,81				

Tabela C9: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
13	1	143,59	63,82	0,01	5,26	0,01
				0,075	12,28	0,23
				0,15	22,81	0,87
				0,35	24,56	2,18
				0,75	12,28	2,33
				1,5	10,53	4
				3	5,26	4
				4,81	1,75	2,14
				8,13	1,75	3,62
				23,14	1,75	10,29
				77,19	1,75	34,30
	2	152,65	67,55	0,035	6,45	0,1
				0,075	20,43	0,63
				0,15	15,05	0,93
				0,35	27,96	4,04
				0,75	12,90	4
				1,5	6,45	4
				3	6,45	8
				5	2,15	4,44
				16,53	1,08	7,35
				82,10	1,08	36,49
	3	172,82	76,81	0,01	7,02	0,02
				0,075	12,28	0,23
				0,15	15,79	0,6
				0,35	31,58	2,8
				0,75	7,02	1,33
				1,5	14,03	5,33
				3	7,02	5,33
				5,52	1,75	2,46
				8,63	1,75	3,84
				125,23	1,75	55,66
	5	167,2	74,31	0,04	6,58	0,09
				0,075	21,1	0,53
				0,15	23,68	1,2
				0,35	19,74	2,33
				0,75	10,53	2,67
				1,5	7,89	4
				3	3,95	4
				4,5	3,95	6
				46,54	1,32	20,69
74,27				1,32	33	

Continua

Tabela C9: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 13 cm/s. (cont.).

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
	10	114,93	51,08	0,015	10,02	0,29
				0,04	13,21	1,03
				0,075	23	3,37
				0,15	20,96	6,13
				0,25	8,88	4,33
				0,4	10,93	8,53
				0,75	7,52	11
				1,5	4,10	12
				2,5	0,91	4,44
				4	0,45	3,55

Tabela C10: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
16	1	90,93	40,41	0,01	18,40	0,8
				0,025	20,96	2,28
				0,04	22,49	3,91
				0,075	21,98	7,17
				0,15	7,57	4,93
				0,35	6,13	9,33
				0,75	2,04	6,67
				1,75	0,20	1,55
				4,15	0,10	1,84
				23,05	0,10	10,25
	2	95,52	42,45	0,01	6,91	0,28
				0,025	9,72	1
				0,04	17,82	2,93
				0,075	34,88	10,77
				0,15	23,11	14,27
				0,25	4,64	4,78
				0,4	1,73	2,84
				0,75	0,86	2,67
				1,5	0,22	1,33
8,60	0,11	3,82				

Tabela C11: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
16	1	103,99	46,22	0,015	10,41	0,29
				0,04	24,94	1,83
				0,075	34,38	4,73
				0,15	19,13	5,27
				0,25	5,57	2,56
				0,4	2,91	2,13
				0,75	0,97	1,33
				1,5	0,48	1,33
				3	0,48	2,67
				5,05	0,24	2,25
				24,01	0,24	10,67
	27,31	0,24	12,14			
	2	97,93	43,52	0,01	4,30	0,07
				0,025	6,45	0,27
				0,04	13,17	0,87
				0,075	25	3,1
				0,15	21,50	5,33
				0,25	12,63	5,22
				0,4	6,99	4,62
				0,75	6,45	8
				1,5	2,15	5,33
				2,5	0,81	3,33
				3,11	0,27	1,38
	18,84	0,27	8,37			
	3	107,14	47,62	0,01	0,64	0,009
				0,025	4,18	0,14
				0,04	10,93	0,60
				0,075	20,26	2,1
				0,15	24,76	5,13
				0,25	14,47	5
				0,4	11,57	6,4
				0,75	7,07	7,33
				1,5	4,50	9,33
2,5				0,64	2,22	
3,28				0,32	1,46	
6,83	0,32	3,04				
16,64	0,32	7,39				

Continua



Tabela C11: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 2939 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s. (cont.).

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida	
	5	112,48	50	0,01	1	0,018	
				0,025	5,20	0,23	
				0,04	11,89	0,85	
				0,075	23,02	3,1	
				0,15	26,48	7,13	
				0,25	10,89	4,89	
				0,4	8,66	6,22	
				0,75	7,92	10,67	
				1,5	4,21	11,33	
				2,5	0,49	2,22	
	16,29	0,25	7,24				
	10	94,31	41,92		0,01	3,98	0,09
					0,025	7,20	0,42
					0,04	16,1	1,51
					0,075	28,79	5,07
					0,15	22,35	7,87
					0,25	9,28	5,44
					0,4	6,25	5,87
					0,75	3,41	6
					1,5	2,08	7,33
2,5					0,38	2,22	
6,14	0,19	2,73					

Tabela C12: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s.

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
16	1	167,87	74,61	0,06	29,41	0,4
				0,15	23,531	0,8
				0,35	23,52	1,87
				0,8	5,88	1,07
				1,6	13,72	4,98
				3,72	1,96	1,65
				144,55	1,96	64,24
	2	149,97	66,65	0,03	11,2	0,19
				0,075	25,6	1,07
				0,15	24	2
				0,35	16,8	3,27
				0,75	12	5
				1,5	4,8	4
				2,25	2,4	3
				6,64	0,8	2,95
				8,19	0,8	3,64
	3	152,67	67,85	0,04	3,45	0,035
				0,075	17,24	0,33
				0,15	36,21	1,4
				0,35	6,90	0,62
				0,75	13,79	2,67
				1,5	10,34	4
				2	1,72	0,89
				5,5	5,17	7,33
				16,94	1,72	7,53
				39,76	1,72	17,67
	5	176,45	78,42	0,035	11,86	0,22
				0,075	18,64	0,73
				0,15	15,25	1,2
				0,35	17,80	3,27
				0,75	13,60	5,33
				1,5	9,32	7,33
				2,5	4,24	5,56
				4	6,78	14,22
				21,29	0,85	9,46
				29,14	0,85	12,95
47,76	0,85	21,23				

Continua

Tabela C12: Resultados obtidos da contagem da área removida, para uma perda de carga máxima de 3919 Pa e velocidade de limpeza de 16 cm/s. (cont.).

Velocidade de limpeza (cm/s)	Número do ciclo	Área total removida (cm <sup>2</sup> )	% da área total do filtro	Distribuição do tamanho médio dos pedaços removidos (cm <sup>2</sup> )	% dos pedaços removidos	% da área total removida
16	10	126,66	56,30	0,035	21,1	1,29
				0,075	21,83	2,87
				0,15	20,30	5,33
				0,35	19,29	11,82
				0,75	10,41	13,67
				1,5	4,06	10,67
				2,5	2,54	11,11
				4	0,51	3,56

ANEXO D

*VARIAÇÃO DAS MASSAS RETIDA E REMOVIDA, COM O  
NÚMERO DE CICLOS, PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES  
EXPERIMENTAIS.*

Como foi citado no item 4.1, a saturação do tecido aconteceu a partir do quarto ciclo de filtração para as perdas de carga de 2939 e 3949 Pa, e a partir do segundo ciclo para a perda de carga de 1960 Pa. No entanto, é mais difícil verificar essas conclusões através das curvas de perda de carga. Desta forma, curvas de massa retida e massa removida foram construídas, como mostram as Figuras D1 a D4.

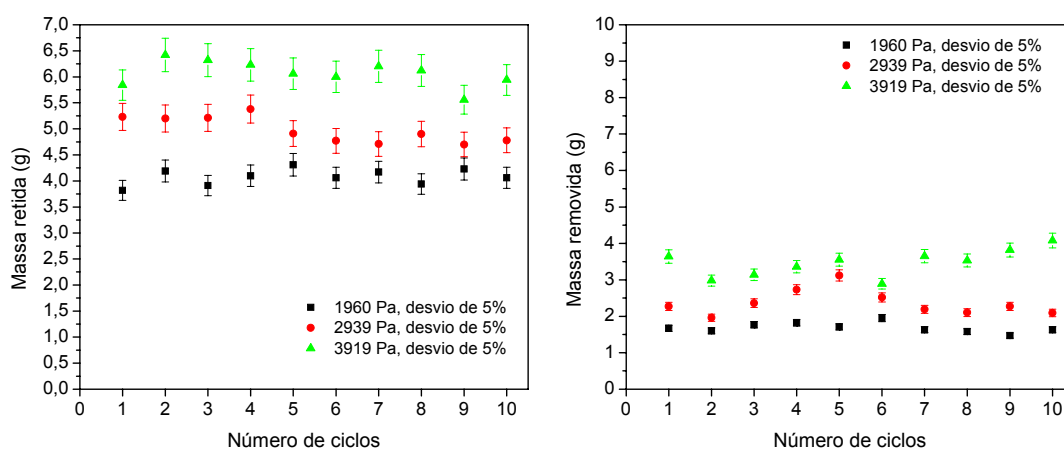


Figura D1: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 5 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.

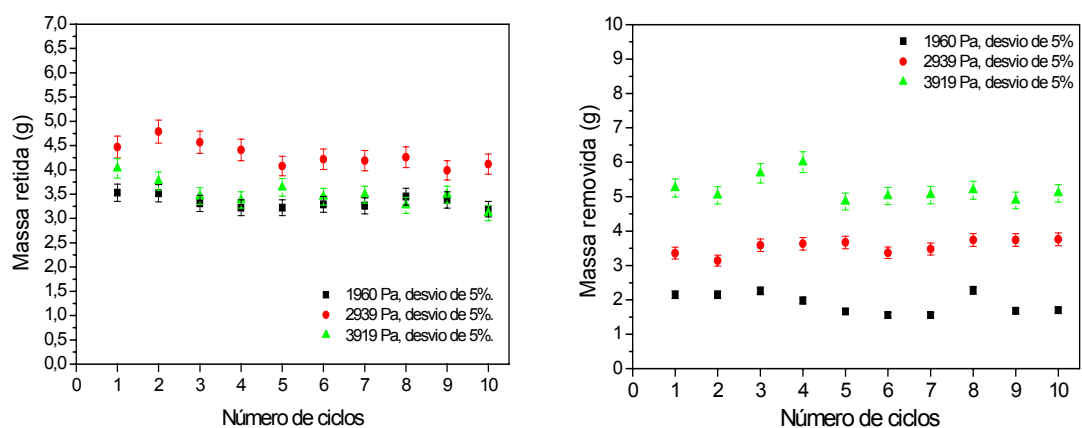


Figura D2: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.

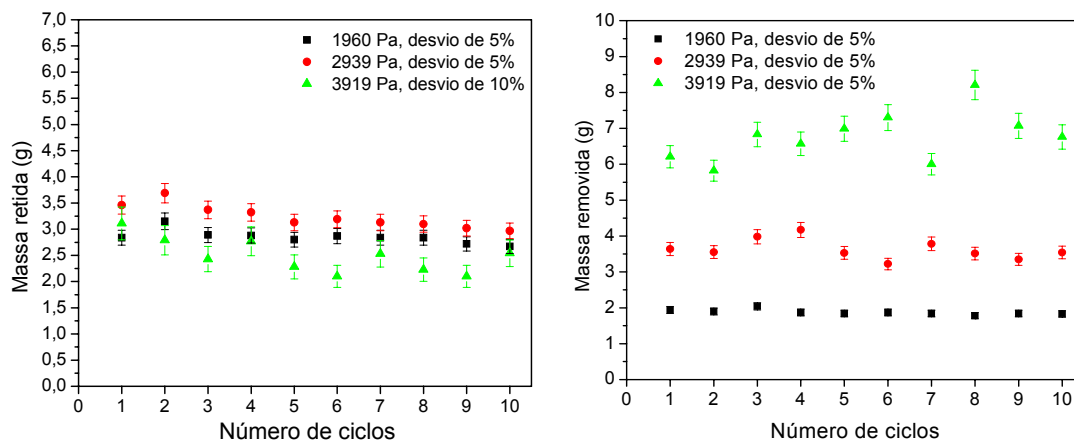


Figura D3: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 13 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.

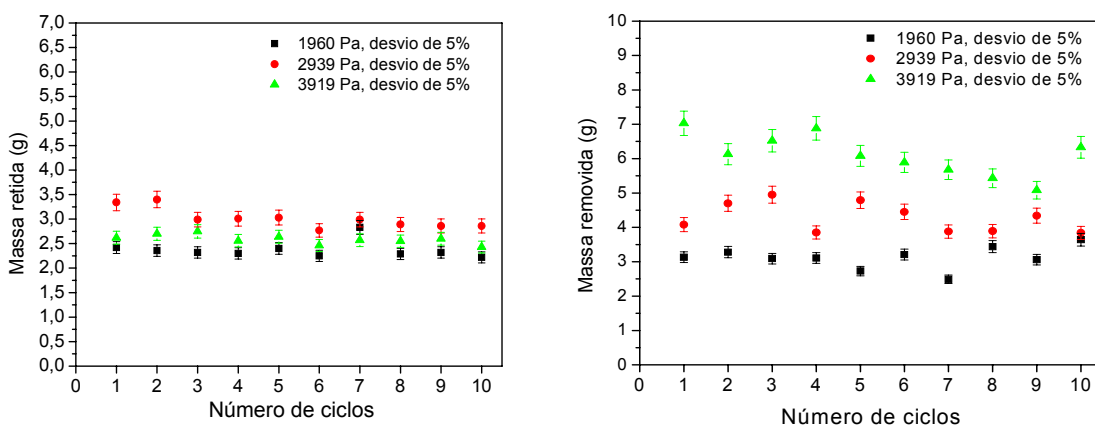


Figura D4: Gráficos de massa retida e massa removida, para uma velocidade de filtração de 5cm/s, velocidade de limpeza de 16 cm/s e diferentes perdas de carga máxima.

Por meio das Figuras D1 a D4, verifica-se que, para a torta de menor espessura (referente à perda de carga máxima de 1960 Pa), em todas as velocidades de limpeza estudadas, tanto a massa retida quanto a massa removida permaneceram aproximadamente constante com o número de ciclos. Isto comprova que a saturação do tecido ocorreu a partir do segundo ciclo de filtração, pois o fato das massas retida e removida permanecerem constantes com o número de ciclos mostrou que a massa que era coletada em cada ciclo de filtração era removida na limpeza seguinte.

Em relação à torta de espessura média (perda de carga máxima de 2939 Pa), tanto a massa retida quanto a massa removida apresentaram tendência de se tornar constante a partir do quarto ciclo de filtração, apesar da massa removida ter apresentado, na velocidade de limpeza de 16 cm/s, variações que oscilaram em torno de 4,5g.

Por fim, para a perda de carga máxima de 3919 Pa, a massa retida apresentou uma tendência de comportamento constante a partir do quarto ciclo de filtração, para todas as velocidades de limpeza. Já a massa removida apresentou oscilações, e em seguida se tornou constante com o número de ciclos.

As oscilações apresentadas nas curvas das Figuras D1 a D4 podem ter sido causadas pela imprecisão da balança, pois se trabalhou com uma balança de duas casas decimais, e como a quantidade de pó é considerada pequena, seria necessário trabalhar com balanças de maior precisão. Além disso, a massa removida era pesada com uma folha sulfite, mas a massa retida era pesada junto com o conjunto filtro+suporte, que pesava  $\pm$  420g. Isso também pode ter influenciado nas oscilações apresentadas nas massas retida e removida.

Devido ao fato das massas retida e removida terem apresentado comportamento constante com o número de ciclos, ou em alguns casos, ter apresentado oscilações, mas que oscilaram em torno de um valor, considerou-se, neste trabalho, que tanto a massa retida quanto a massa removida apresentaram comportamento constante com o número de ciclos. Desta forma, calculou-se a média dos dez ciclos obtidos de cada experimento, para se obter, de uma forma mais sucinta, a variação das massas retida e removida com as variáveis investigadas neste trabalho.