



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

SAMIRYS SARA RODRIGUES CIRQUEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CICLOS DE FILTRAÇÃO
E REGENERAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES COM LIMPEZA
POR PULSO DE AR REVERSO**

**SÃO CARLOS
2013**

SAMIRYS SARA RODRIGUES CIRQUEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS CICLOS DE FILTRAÇÃO
E REGENERAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES COM LIMPEZA
POR PULSO DE AR REVERSO**

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

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Mônica Lopes Aguiar

**SÃO CARLOS
2013**

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

C578ad	<p>Cirqueira, Samirys Sara Rodrigues. Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso / Samirys Sara Rodrigues Cirqueira. -- São Carlos : UFSCar, 2013. 129 f.</p> <p>Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.</p> <p>1. Filtração de gases. 2. Meios filtrantes. 3. Limpeza de gases. I. Título.</p> <p>CDD: 660.284245 (20^a)</p>
--------	---

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE **SAMIRYS SARA RODRIGUES CIRQUEIRA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 11 DE ABRIL DE 2013.

BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Sandra Mara Santana Rocha
UFES


Gabriela Cantarelli Lopes
UFSCar

*Aos meus amados pais, Maurílio e Soraya,
pessoas muito importantes em minha vida.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos e força para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Maurílio e Soraya, minha irmã, Laila, pelo amor, incentivo e, sobretudo, por acreditarem em todas minhas escolhas.

Aos melhores tios do mundo, Osvaldinho e Léia, meu avô, Osvaldo, e meus primos, Carlos Henrique e Bárbara (afilhada), pelo amor como irmãos.

A todos meus familiares por estarmos sempre unidos. Em especial, a minha avó, Benvinda, por todo amor, fé e pela saudade que se faz presente.

A professora Mônica, pela orientação, pela oportunidade, pelos ensinamentos transmitidos e principalmente por ter acreditado neste trabalho.

Aos professores membros da banca do Exame de Qualificação, Eduardo e Sandra, pelas valiosas contribuições.

A todos os professores que passaram em minha vida, em particular, a professora Ana, pela aprendizagem durante a iniciação científica e toda a graduação.

Aos técnicos, Oscar, Adilson e Marcos, pela disposição e ajuda na manutenção da unidade experimental.

Aos amigos e vizinhos pela grande amizade construída durante o tempo em São Carlos.

Ao Amilcar, pela compreensão, carinho e estar sempre ao meu lado.

A Priscila, por estar presente desde os meus primeiros passos na Engenharia e em todos os momentos compartilhados nesta jornada.

Aos amigos da FCT- UNESP que passaram e seguem presentes, em especial ao Tony Dadamos.

A todos os amigos de infância pela constante amizade.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro e ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar pela infra-estrutura para realização deste trabalho.

Finalmente, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, com uma palavra de consolo, incentivo, convívio ou carinho.

*“Para alcançar um objetivo é necessário
querer e acreditar em Deus”.*
Samirys S. R. Cirqueira.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	I
LISTA DE TABELAS	V
NOMENCLATURA.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Organização do trabalho.....	1
1.2. Motivação e justificativa do trabalho	1
1.3. Objetivos do trabalho	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Filtrações de Gases	5
2.2. Tecidos filtrantes	8
2.3. Mecanismos de deposição de partículas.....	12
2.4. Mecanismos de remoção de partículas	16
2.4.1. Remoção de partículas por pulso de ar reverso.....	17
2.4.2. Estudos envolvendo pulso de ar reverso.....	21
2.5. Aspectos relevantes no estudo da filtração de gases	23
2.5.1. Queda de pressão no Filtro de Mangas.....	24
2.5.2. Porosidade dos meios filtrantes	28
2.5.3. Porosidade da torta de filtração	29
2.5.4. Velocidade de filtração.....	30
2.5.5. Fração de massa removida.....	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. Caracterização do material particulado	33
3.2. Caracterizações dos tecidos filtrantes.....	36
3.3. Unidade experimental.....	38
3.4. Metodologia experimental.....	40
3.4.1. Alimentação de pó.....	40
3.4.2. Fluxo de ar	40
3.4.3. Planejamento experimental	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1. Ensaio de filtração e limpeza no feltro polipropileno	44
4.2. Influência do número de ciclos de filtração e limpeza no tecido de polipropileno.....	53
4.2.1. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 1º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso	53
4.2.2. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 10º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso	54
4.2.3. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.....	57
4.2.4. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.....	62
4.2.5. Análises dos filtros de polipropileno após filtração e limpeza por pulso de ar reverso	67
4.3. Ensaio de filtração e limpeza no feltro de acrílico.....	75
4.4. Influência do número de ciclos de filtração e limpeza no tecido de acrílico..	82

4.4.1.	Queda de pressão em função do tempo de filtração - 1º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso	82
4.4.2.	Queda de pressão em função do tempo de filtração - 10º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso	83
4.4.3.	Queda de pressão em função do tempo de filtração em 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.....	86
4.4.4.	Queda de pressão em função do tempo de filtração em 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.....	90
4.4.5.	Análises dos filtros de acrílico após a filtração e limpeza por pulso de ar reverso	95
4.5.	Comparações entre os meios filtrantes: Polipropileno e Acrílico	101
5.	CONCLUSÕES	109
6.	PROPOSTAS FUTURAS	111
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112
	APÊNDICE A	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Filtração de gases.....	5
Figura 2. 2 – Queda de pressão em função da massa acumulada para o primeiro ciclo de filtração.....	6
Figura 2. 3 - Determinação do ponto de colmatação do meio, através da perda de carga em função da carga mássica.	7
Figura 2. 4- Tipos de confecção de fios sintéticos.	9
Figura 2. 5 - Estrutura de um (a) tecido plano e (b) estrutura da superfície do tecido trançado gerado no MEV com ampliação de 100x.	10
Figura 2. 6 - Estrutura da superfície do tecido não trançado.....	11
Figura 2. 7 Desenho esquemático da captura de partículas por interceptação direta.	12
Figura 2. 8 – Desenho esquemático da captura de partículas por impactação inercial. .	13
Figura 2. 9 – Desenho esquemático da captura de partículas por difusão.....	13
Figura 2. 10 – Desenho esquemático da captura de partículas por ação gravitacional. .	14
Figura 2. 11 – Captura de partículas por deposição eletrostática.	14
Figura 2. 12 – Mecanismos de coleta e eficiência dos mesmos.	15
Figura 2. 13 – Desenho esquemático da operação (a) de filtração do meio filtrante e (b) de limpeza do meio filtrante por pulso de ar reverso.	18
Figura 2. 14 – Ilustração do mecanismo de limpeza por pulso de ar.	20
Figura 2. 15 - Comportamento real e ideal da perda de carga em função do tempo de filtração.....	27
Figura 3. 1 - Material particulado rocha fosfática (aumento de 2000x), gerado no MEV.	34
Figura 3. 2 - Micro análise da rocha fosfática.....	35
Figura 3. 3- Distribuição granulométrica do material particulado.	35
Figura 3. 4- Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV (a) com ampliação de 50x e (b) com ampliação de 500x.....	37
Figura 3. 5 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV (a) com ampliação de 50x e (b) com ampliação de 500x.	37
Figura 3. 6 - Ilustração do equipamento de filtração/limpeza por pulso a jato de ar.	38
Figura 3. 7 – Queda de pressão no meio filtrante pela vazão de filtração.....	41
Figura 4.1 – Massa retida e queda de pressão residual em função do tempo de pulso, para o tecido de polipropileno.	45
Figura 4.2 - Fração removida em função do tempo de pulso, no feltro de polipropileno.	46
Figura 4.3 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a tempo de pulso de 200 ms com ampliação de 2000x, (b) a tempo de pulso de 1.000 ms com ampliação de 2000x.....	47
Figura 4.4 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, a queda de pressão de 100, 150, 200, 250 e 300 Pa no tecido de polipropileno.	48
Figura 4.5 – Massa retida por unidade de área após a limpeza em função da queda de pressão máxima.	49
Figura 4.6 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a queda de pressão de 100 Pa com ampliação de 2000x e (b) a queda de pressão de 300 Pa com ampliação de 2000x.....	50
Figura 4.7 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, a velocidade de 2, 4 e 6 cm/s no tecido de polipropileno.	51

Figura 4.8 –A massa retida, a massa da torta e a resistência específica da torta em função da velocidade de filtração.	51
Figura 4.9 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após 1 ciclo de filtração e limpeza (a) à velocidade 2 cm/s com ampliação de 2000x e (b) à velocidade 6 cm/s com ampliação de 2000x.	52
Figura 4.10 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) antes da filtração, com ampliação de 500x, e (b) após 1 ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com ampliação de 500x.....	54
Figura 4.11 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 10 ciclos de filtração e limpeza.	55
Figura 4.12 - Número de ciclos em função da massa retida e da queda de pressão residual.	55
Figura 4.13 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) em um ciclo de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) em 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.	56
Figura 4.14 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 20 ciclos de filtração e limpeza.	57
Figura 4.15 – Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 30 ciclos de filtração e limpeza.	57
Figura 4.16 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 40 ciclos de filtração e limpeza.	58
Figura 4.17 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 50 ciclos de filtração e limpeza.	58
Figura 4.18 - Comparação entre o 1º ciclo e o 20º, o 30º, 40º e o 50º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.....	59
Figura 4.19 - Comportamento da queda de pressão residual em função dos 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza no tecido de polipropileno.	60
Figura 4.20 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) após 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) depois de utilizado em 50 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.	61
Figura 4.21 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 100 ciclos de filtração e limpeza no Polipropileno.....	62
Figura 4.22 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 150 ciclos de filtração e limpeza no Polipropileno.....	63
Figura 4.23 - Queda de pressão em função do tempo, para os 200 ciclos de filtração e limpeza no Polipropileno.....	63
Figura 4.24 - Comparação entre o 1º ciclo e o 100º, 150º e 200º ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso no Polipropileno.	64
Figura 4.25 - Queda de pressão residual em função dos dois ensaios, referente aos ensaios a 100, 150 e a 200 ciclos de filtração e limpeza.	65
Figura 4.26 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) após 100 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, (b) após 150 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (c) após 200 ciclos de filtração e limpeza,	66
Figura 4.27 - Comportamento do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso na massa por unidade de área e na queda de pressão residual.....	67
Figura 4.28 - Relação entre a queda de pressão residual e a massa retida para o polipropileno e rocha fosfática.	68
Figura 4.29 - Fração de massa removida da torta em função do número de ciclos, no Polipropileno.	69

Figura 4.30 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após os ciclos de filtração e limpeza em (a) 1 ciclo, (b) 10 ciclos, (c) 50 ciclos, (d) 100 ciclos, (e) 150 ciclos, e (f) 200 ciclos, com ampliação de 500x.	70
Figura 4.31 - Número de ciclos de filtração em função da resistência específica e da porosidade da torta de filtração.	72
Figura 4.32- Curva para determinar a permeabilidade do meio filtrante polipropileno.	73
Figura 4.33 - Permeabilidade Darciana em função do número de ciclos de filtração e limpeza, no feltro polipropileno.	74
Figura 4.34 – Massa retida e Queda de pressão residual em função do tempo de pulso, para o tecido de acrílico.	75
Figura 4.35 - Fração removida em função do tempo de pulso, no feltro de acrílico.	76
Figura 4.36 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a tempo de pulso de 200 ms com ampliação de 2000x, (b) a tempo de pulso de 1000 ms com ampliação de 2000x.	77
Figura 4.37 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, variando a queda de pressão.	78
Figura 4.38 – Massa retida por unidade de área após a limpeza em função da queda de pressão máxima.	78
Figura 4.39 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a queda de pressão de 100 Pa com ampliação de 2000x, (b) a queda de pressão de 300 Pa com ampliação de 2000x.	79
Figura 4.40 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, variando a velocidade de filtração.	80
Figura 4.41 –A massa retida, a massa da torta e a resistência específica da torta em função da velocidade de filtração.	80
Figura 4.42- Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após 1 ciclo de filtração e limpeza (a) a velocidade 2 cm/s com ampliação de 2000x, (b) a velocidade 6 cm/s com ampliação de 2000x.	81
Figura 4.43 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV (a) em um ciclo de filtração, antes da limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) em 1 ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com ampliação de 2000x.	83
Figura 4.44 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 10 ciclos.	84
Figura 4.45 – 10 ciclos em função da massa retida após a limpeza e da queda de pressão residual.	84
Figura 4.46 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) em um ciclo de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) em 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.	85
Figura 4.47 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 20 ciclos de filtração e limpeza, no acrílico.	86
Figura 4.48 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 30 ciclos de filtração e limpeza.	87
Figura 4.49 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 40 ciclos de filtração e limpeza.	87
Figura 4.50 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 50 ciclos de filtração e limpeza.	88
Figura 4.51 - Comparação entre o 1º ciclo e o 20º, o 30º, o 40º e o 50º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.	88
Figura 4.52 - Comportamento da queda de pressão residual em função dos 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza no acrílico.	89

Figura 4.53 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV, (a) após 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) depois de utilizado em 50 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.	90
Figura 4.54 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 100 ciclos de filtração e limpeza, no acrílico.	91
Figura 4.55 – Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 150 ciclos de filtração e limpeza.	91
Figura 4.56 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, em 200 ciclos de filtração e limpeza.	92
Figura 4.57 - Comparação entre o 1° e os 100°, 150° e 200° ciclos de filtração e limpeza no acrílico.	92
Figura 4.58 - Queda de pressão residual em função dos três ensaios, referente aos ensaios a 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza a pulso de ar reverso.	93
Figura 4.59 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV, (a) após 100 ciclos, (b) após 150 ciclos e (c) após 200 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2.000x.	94
Figura 4.60 - Comportamento do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso na massa por unidade de área e na queda de pressão residual.	95
Figura 4.61 - Relação entre a queda de pressão residual e a massa retida para o acrílico e rocha fosfática.	96
Figura 4.62 - Fração removida em função do número de ciclos, no acrílico.	96
Figura 4.63 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após os ciclos de filtração e limpeza em (a) 1 ciclo, (b) 10 ciclos, (c) 50 ciclos, (d) 100 ciclos, (e) 150 ciclos, e (f) 200 ciclos, com ampliação de 500x.	98
Figura 4.64 - Influência do número de ciclos na Resistência específica e na Porosidade da torta de filtração.	99
Figura 4.65 - Curva para determinar a permeabilidade do meio filtrante acrílico.	100
Figura 4.66 - Permeabilidade Darciana em função do número de ciclos de filtração e limpeza, no feltro acrílico.	101
Figura 4.67 - Gráfico comparativo dos últimos ciclos em termos de queda de pressão e de tempo de filtração, para o tecido de (a) polipropileno e de (b) acrílico.	101
Figura 4.68 - Queda de pressão residual em função do número de ciclos, nos tecidos de polipropileno e de acrílico.	102
Figura 4.69 - Número de ciclos em função da massa por unidade de área, para o Polipropileno e o Acrílico.	103
Figura 4.70 - Fração removida da torta com o número de ciclos, utilizando o tecido de Polipropileno e de Acrílico.	104
Figura 4.71 - Fotografias das superfícies dos tecidos de (a) polipropileno e de (b) acrílico geradas no MEV após 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com ampliação de 500x.	104
Figura 4.72 - Curvas comparativas da resistência específica da torta para os dois tecidos.	105
Figura 4.73 – Porosidade da torta de filtração em função do número de ciclos para o tecido de polipropileno e acrílico.	106
Figura 4.74 - Permeabilidade dos meios filtrantes com o número de ciclos.	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Propriedades de algumas fibras sintéticas.....	8
Tabela 2. 2 – Mecanismos de limpeza.....	17
Tabela 3. 1 - Especificações técnicas dos tecidos filtrantes.....	36
Tabela 3. 2 – Velocidades de filtração e vazões de gás utilizadas.....	42
Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados nos ensaios de filtração e limpeza do meio filtrante.	44
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados nos cálculos da resistência específica da torta de filtração.....	71
Tabela A 1 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido virgem Acrílico.....	123
Tabela A 2 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 1 ciclo de filtração e limpeza.....	123
Tabela A 3 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 10 ciclos de filtração e limpeza.....	124
Tabela A 4 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 20 ciclos de filtração e limpeza.....	124
Tabela A 5 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 30 ciclos de filtração e limpeza.....	124
Tabela A 6 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 40 ciclos de filtração e limpeza.....	125
Tabela A 7 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 50 ciclos de filtração e limpeza.....	125
Tabela A 8 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 100 ciclos de filtração e limpeza.....	125
Tabela A 9 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 150 ciclos de filtração e limpeza.....	126
Tabela A 10 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 200 ciclos de filtração e limpeza.....	126
Tabela A 11 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido virgem Polipropileno.....	126
Tabela A 12 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 1 ciclo de filtração e limpeza.....	127
Tabela A 13 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 10 ciclos de filtração e limpeza.....	127
Tabela A 14 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 20 ciclos de filtração e limpeza.....	127
Tabela A 15 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 30 ciclos de filtração e limpeza.....	128
Tabela A 16 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 40 ciclos de filtração e limpeza.....	128
Tabela A 17 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 50 ciclos de filtração e limpeza.....	128
Tabela A 18 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 100 ciclos de filtração e limpeza.....	129
Tabela A 19 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 150 ciclos de filtração e limpeza.....	129

Tabela A 20 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 200 ciclos de filtração e limpeza.....	129
--	-----

NOMENCLATURA

Letras Latinas:

A_C - área superficial da torta de filtração

A - área de filtração

c - coeficiente de descarga

d_p - diâmetro médio das partículas

$D_{orificio}$ - diâmetro da placa de orifício

E_L - eficiência de limpeza

f_{MR} - fração de massa removida

K - constante de vazão volumétrica

κ_1 - constante de permeabilidade Darciana

κ_C - resistência específica da torta

κ_M - resistência específica do meio filtrante

L - espessura do meio filtrante

L_C - espessura da torta de filtração

M_D - massa desprendida

M_T - massa da torta de filtração

Q - vazão mássica de pó

$Q_{volumétrica}$ - vazão volumétrica

t - tempo de filtração

T - tempo total da filtração

v - vazão de pó depositada no meio filtrante

V_F - velocidade de filtração

W - massa de material particulado por unidade de área

ΔP - queda de pressão na direção do escoamento

ΔP_T - queda de pressão total

ΔP_M - queda de pressão no meio filtrante

ΔP_C - queda de pressão da torta de filtração

ΔM - massa acumulada por unidade de área

Letras Gregas:

β - diâmetro da placa de orifício pelo diâmetro da tubulação

ε - porosidade da torta de filtração

ε_{MP} - porosidade do meio poroso

ρ_P - densidade de partícula

μ - viscosidade do fluido

η_T - eficiência total de captura de particulados

η_D - eficiência do mecanismo difusional

η_{ID} - eficiência do mecanismo de interceptação direta

η_I - eficiência do mecanismo inercial

η_G - eficiência do mecanismo gravitacional

η_E - eficiência do mecanismo eletroforético

Siglas:

MEV- Microscopia eletrônica de varredura

DEQ- Departamento de Engenharia Química

UFSCar- Universidade Federal de São Carlos

RESUMO

CIRQUEIRA, Samirys Sara Rodrigues. (2013). **Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

A presença de partículas após a limpeza por pulso de ar reverso no interior do meio filtrante garante o aumento da queda de pressão do ciclo subsequente. O desempenho do meio filtrante após vários ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, não é claramente conhecido. Para tal finalidade, teve-se como objetivo principal a investigação do desempenho do meio filtrante com limpeza por pulso de ar reverso, através do estudo da eficiência de limpeza e da observação da regeneração dos meios filtrantes. A satisfatória performance da unidade experimental foi observada nos ensaios preliminares durante a filtração e limpeza por pulso de ar reverso, utilizando como meio filtrante o polipropileno e o acrílico, e como material particulado o concentrado fosfático. Verificou-se a influência do acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza no comportamento dos meios filtrantes, mantendo-se a velocidade de filtração de 4 cm/s, a queda de pressão de 200 Pa e o tempo de pulso de 200 ms. Observou-se, mesmo com a heterogeneidade dos meios filtrantes, que houveram partículas retidas na superfície do tecido, que aumentaram com o acréscimo do número de ciclos. Constatou-se, ao comparar os meios filtrantes submetidos a duzentos ciclos de filtração e limpeza, que o filtro de polipropileno apresentou maior permeação, maior resistência específica e porosidade da torta, maior quantidade de massa retida após a limpeza e maior eficiência de limpeza, comparada ao filtro de acrílico utilizando os mesmos parâmetros operacionais. No entanto, o desempenho foi satisfatório para ambos os meios filtrantes, que apesar de suas diferenciações, mostraram-se adequados em operações de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

Palavras-chave: Filtração e limpeza de gases, pulso de ar reverso, meios filtrantes.

ABSTRACT

CIRQUEIRA, Samirys Sara Rodrigues. (2013). **Evaluation of the performance of filtration cycles and regeneration of filter media with reverse air pulse cleaning.** Master's dissertation. Federal University of São Carlos, São Carlos, 2013.

The presence of particles after the reverse air pulse cleaning process inside the filter medium ensures the increase in pressure drop of the subsequent cycle. The performance of the filter medium after several filtration cycles and cleaning cycles with reverse air pulse is not clearly known. For this purpose, the main objective of this work was to investigate the performance of the filter medium with reverse air pulse cleaning through the study of cleaning efficiency and by observing the regeneration of filter media. The satisfactory performance of the experimental unit was observed in the preliminary trials during filtration and cleaning by reverse air pulse having polypropylene and acrylic as filter media and phosphate concentrate as particulate matter. It was found that the increase in the number of filtration and cleaning cycles had an influence on the behavior of the filter media, when the filtration velocity was kept at 4 cm/s, the pressure drop at 200 Pa and with pulse time of 200 ms. It was observed that, even with the heterogeneity of filter media, particles were trapped on the surface of the fabric and the number of particles retained increased with the increase in the number of cycles. When comparing the filter media submitted to two hundred filtration and cleaning cycles, it was found that the polypropylene filter presented greater permeability, greater specific resistance and cake porosity, greater amount of mass retained after cleaning and greater cleaning efficiency than the acrylic filter using the same operational parameters. However, the performance was satisfactory for both filter media which, despite their differences, showed to be adequate for the operations of filtration and reverse air pulse cleaning.

Keywords: Gas filtration and cleaning, reverse air pulse, filter media.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Organização do trabalho

O texto está reunido em seis capítulos, em que uma abordagem inicial sobre a motivação, justificativa e objetivo do trabalho são apresentados no primeiro capítulo. O segundo capítulo traz os referenciais principais do estudo desenvolvido sobre a filtração de gases, os tecidos filtrantes, os principais parâmetros operacionais, e os mecanismos de captura e remoção de particulados por pulso de ar reverso.

O terceiro capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados nos ensaios de filtração, como foram realizadas as caracterizações do material particulado e dos tecidos filtrantes, a unidade experimental do equipamento de filtração e limpeza, e a metodologia utilizada para obtenção dos dados de queda de pressão em função do tempo de filtração, durante toda operação.

No quarto capítulo, aborda-se a análise dos resultados práticos e suas discussões; e no quinto capítulo têm-se as conclusões do trabalho. E por fim, no sexto capítulo descrevem-se as sugestões para dar continuidade ao presente trabalho de mestrado.

1.2. Motivação e justificativa do trabalho

A poluição do ar é um dos efeitos que foram trazidos principalmente pela Revolução Industrial no início do século XVIII. É também um grande fator de risco a ser controlado por causar inflamação no aparelho respiratório induzida pela ação de substâncias oxidantes e doenças cardiovasculares. Portanto, interfere direta e indiretamente na saúde, na segurança e no bem estar dos seres vivos (CANÇADO *et al.*, 2006; MARTINS *et al.*, 2012; BENTO *et al.*, 2012).

Os poluentes do ar mais comuns são os materiais particulados, aerossóis, vapores e gases, por sua vez podem ser classificados em orgânicos, inorgânicos e biológicos (CETESB, 2012). Os problemas respiratórios que o material particulado pode apresentar estão relacionados ao tamanho das partículas e suas propriedades físico-químicas (BRAGA e TEIXEIRA, 2004; CARNEIRO, 2012; HABERMANN e GOUVEIA, 2012). Partículas maiores que 10 μm são retidas no nariz e nasofaringe, já as partículas menores que 10 μm de diâmetro (MP_{10}) são retidas nas vias aéreas superiores e na região traqueobrônquica (CETESB, 2012). Partículas menores que 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$) de diâmetro causam os maiores riscos a saúde (MUKHOPADHYAY e DHAWAN, 2009).

Como forma de minimizar a emissão de poluentes no ar, tem-se os equipamentos de controle ambiental. Dentre estes há cinco categorias principais, que são as câmaras gravitacionais (ou inerciais), os ciclones, os precipitadores eletrostáticos, os lavadores ('scrubbers') e os filtros, em particular os filtros de mangas.

Além de serem usados no combate à poluição, os equipamentos de controle ambiental também são aplicados nos processos produtivos industriais, colaborando na redução de custos por meio do reaproveitamento e economia de materiais e energia, com a reciclagem de resíduos, a minimização da geração de poluentes e a separação de material particulado (SOUZA *et al.*, 2012).

Dos equipamentos de separação gás-sólido via seca, os filtros de mangas merecem destaque porque possuem uma ótima eficiência, devido à combinação entre a máxima eficiência de coleta e a mínima queda de pressão. Normalmente apresenta 99,99 % de eficiência de coleta, dentro do exigido pela legislação, com custo relativamente baixo (LORA, 2002).

Os filtros de tecido são excelentes na captura de material particulado fino (MP_{10} , e $\text{MP}_{2,5}$), ou seja, removem um dos principais responsáveis pelas doenças respiratórias. Por isso, é necessário estudar o desempenho do equipamento de captura destas partículas finas e conhecer o tecido utilizado como meio filtrante, suas modificações durante a etapa de regeneração, para aumentar a vida útil do tecido e melhorar a retenção de particulados.

Com esta perspectiva, iniciou-se a investigação do desempenho do equipamento de controle ambiental pela operação de filtração e limpeza por pulso de ar como forma

de contribuir na avaliação desta tecnologia para solução de problemas ambientais e na redução de custos das empresas.

1.3. Objetivos do trabalho

O trabalho teve como objetivo geral investigar o desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar, através da verificação da eficiência de limpeza e da observação da possível regeneração dos meios filtrantes após ciclos de filtração e limpeza.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- verificar a influência do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso na regeneração dos meios filtrantes;
- obter a massa retida, a massa depositada e a massa desprendida, assim como a eficiência de remoção das partículas por pulso de ar reverso;
- determinar a resistência específica da torta através de dados experimentais;
- determinar a porosidade da torta de filtração por meio de uma equação clássica encontrada na literatura;
- determinar a permeabilidade do meio filtrante virgem (sem ser utilizado na filtração) e a permeabilidade do meio filtrante após ser utilizado em até duzentos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar;
- observar as mudanças provocadas no meio filtrante pela etapa de limpeza por pulso de ar através de imagens superficiais geradas no MEV.

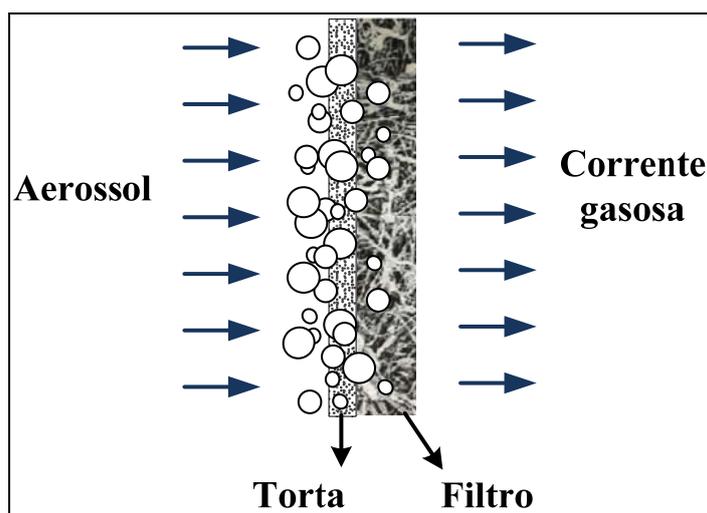
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos necessários para o desenvolvimento do trabalho sobre a regeneração dos meios filtrantes, a operação de filtração, a formação e remoção das tortas de filtração, e também alguns estudos relacionados encontrados na literatura.

2.1. Filtrações de Gases

A operação de filtração consiste na separação de material particulado (sólido), de um fluido (gás ou líquido), pelas vias sólido-gás ou sólido-líquido por meio de um coletor de partículas poroso e permeável (filtro), como apresenta a Figura 2. 1.

Figura 2. 1 - Filtração de gases.

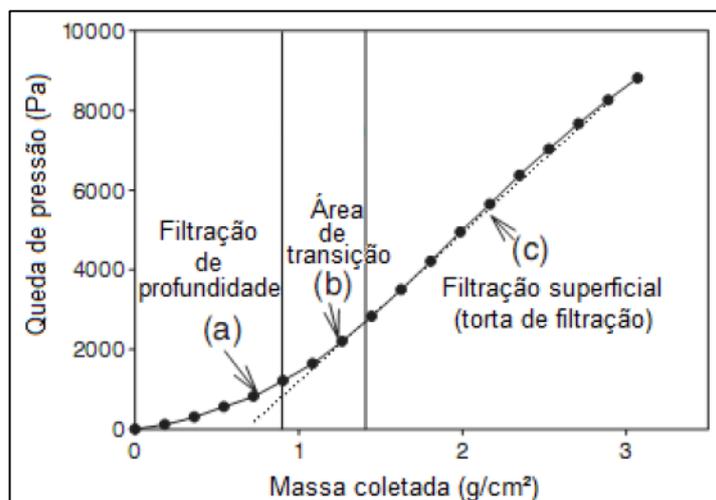


Fonte: Adaptado de TANABE, 2011.

Em operações de filtração de gás, o filtro é posicionado perpendicularmente ao fluxo de gás e através dele passa uma corrente de gás carregado de partículas. O gás contendo partículas cruza o elemento coletor, denominado meio filtrante. Assim, o meio filtrante retém as partículas, separando-as dos gases (POWER, 1998).

A classificação da operação de filtração se dá em duas categorias referentes ao que ocorre com os meios filtrantes. A filtração que acontece no interior do meio filtrante, na qual há penetração das partículas na sua estrutura, nomeia-se como filtração interna (de profundidade) ou “*deep filtration*”. Nela o meio filtrante é o responsável pela captura das partículas. A filtração que ocorre na superfície do meio filtrante denomina-se como filtração superficial ou “*cake filtration*”, em que a camada de pó formada na superfície do meio filtrante torna-se responsável pela captura de partículas. Essas partículas aderidas ao meio filtrante formam as tortas de filtração, camada fina de pó retida na superfície do filtro. Posteriormente, a camada de pó formada passa a desempenhar o papel de superfície filtrante (DULLIEN, 1989; TIENI, 2005). Na Figura 2.2 é ilustrada a queda de pressão em função da massa acumulada para o primeiro ciclo de filtração.

Figura 2. 2 – Queda de pressão em função da massa acumulada para o primeiro ciclo de filtração.

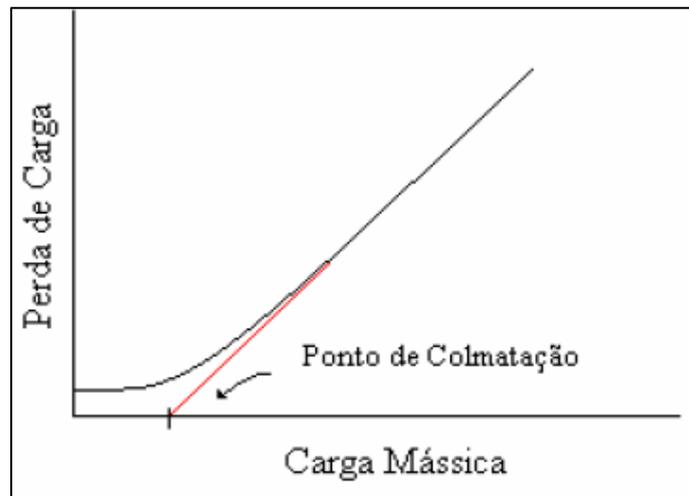


Fonte: SONG, 2006.

O exato momento de formação da torta admitido por muitos autores é obtido experimentalmente. Normalmente é designado por ponto de colmatação, ou seja, é a capacidade de retenção do meio filtrante durante a filtração. Na Figura 2.3 é

apresentado o ponto de colmatação do meio. Desta forma, obtêm a massa necessária para formar a torta filtrante (WALSH e STENHOUSE, 1997).

Figura 2.3 - Determinação do ponto de colmatação do meio, através da perda de carga em função da carga mássica.



Fonte: WALSH, 1996.

O tempo de ocorrência do ponto de colmatação relaciona-se ao tamanho das partículas. Para partículas menores envolvidas na operação de filtração, o ponto de colmatação ocorre rapidamente (WALSH *et al.*, 1996).

O aumento da espessura da torta de filtração observa-se pelo acréscimo da queda de pressão na operação de filtração. Consequentemente necessita-se de uma limpeza periódica do meio filtrante para promover a regeneração deste e manter a queda de pressão em níveis adequados para a operação. Deste modo, após a limpeza do meio filtrante, espera-se que o filtro retome suas propriedades iniciais pela remoção completa da torta. Já na prática, constata-se a permanência de uma camada fina de material particulado sobre o filtro, devido à ocorrência da filtração superficial juntamente à filtração de profundidade (KOCH *et al.*, 1996).

A liberação do material particulado depende das características do meio filtrante. A seleção do meio filtrante adequado encontra-se acoplada a fatores distintos. Porém, necessariamente os mais acentuados são a compatibilidade química e térmica do material do filtro com relação ao fluido a ser filtrado (RIBEIRO e FERNANDES, 2005). Na filtração de gases industriais há três tipos de meios filtrantes, classificados como filtros de tecido, filtros fibrosos e filtros granulares (DULLIEN, 1989).

Particularmente o filtro de tecido tem capacidade de capturar partículas micrométricas, com eficiência acima de 99% (AGUIAR e COURRY, 1996). Por isso, é de grande interesse deste estudo a descrição destes meios filtrantes.

2.2. Tecidos filtrantes

Os meios filtrantes podem ser constituídos de fibras sintéticas, de fibras naturais e de fibras artificiais. Apesar das fibras sintéticas possuírem preço mais elevado do que as fibras naturais, elas tem maior vida útil (EMPRESA SITAPE, 2013). Além de preencher menos os poros do filtro essas fibras oferecem menos resistência no processo de remoção das partículas aderidas e, por isso, tem obtido maior utilização no mercado de filtros de ar (CHOI, 2008).

Como fibras sintéticas podem-se citar o poliéster, o polipropileno, o acrílico, o polietileno e a poliamida. Como fibras naturais têm-se o algodão, a lã, o cetim, a celulose, as metálicas (níquel-cromo e césio-cromo), as cerâmicas, entre outras. Como fibras artificiais incluem-se a viscose, o vidro, o silicone e o acetato. Na Tabela 2.1 são apresentadas as propriedades de algumas fibras sintéticas utilizadas no mercado.

Tabela 2. 1 - Propriedades de algumas fibras sintéticas.

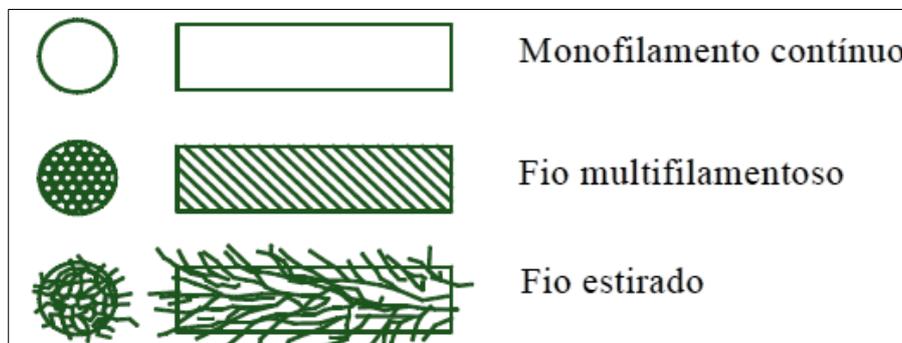
Propriedades	Filtro de Polipropileno	Filtro de Acrílico
Sigla DIN 60001	PP	PAC
Umidade absorvida pela fibra	0,01	1,50
Temperatura máxima (°C)	90	120
Resistência calor úmido	Excelente	Boa
Resistência à abrasão	Boa	Boa
Densidade específica	0,90	1,16
Não resiste a altas concentrações	-	H ₂ SO ₄ e HNO ₃
Propagação da combustão	Sim	Sim

Fonte: GINO CACCIARI, 2010.

A quantidade e o tipo de filamentos das fibras do meio filtrante afeta significativamente a sua permeabilidade e o resultado da filtração. Na Figura 2.4 são mostrados alguns tipos de confecção de fios sintéticos.

O monofilamento representa em quantidade um único fio na estrutura da fibra, ou seja, forma-se pela extrusão de um filamento de fibra contínua, após a solidificação. O fio multifilamentoso concebe em quantidade vários fios formando um único filamento na estrutura da fibra do tecido, por isso apresenta-se formado por muitas fibras torcidas juntamente assim que se solidificam (DONOVAN, 1985). E, este possui maior flexibilidade, maior espessura e mais justa estrutura em relação ao monofilamento. Diferente do monofilamento e do fio multifilamentoso tem-se os fios estirados. Os fios estirados são mais volumosos, mais rígidos e possuem maior capacidade de coleta em relação ao monofilamento e ao fio multifilamentoso. Estes são formados por fibras sintéticas cortadas e processadas como as fibras naturais. A desvantagem deste fio consiste na dificuldade de limpeza da torta de filtração (RODRIGUES, 2006).

Figura 2. 4- Tipos de confecção de fios sintéticos.



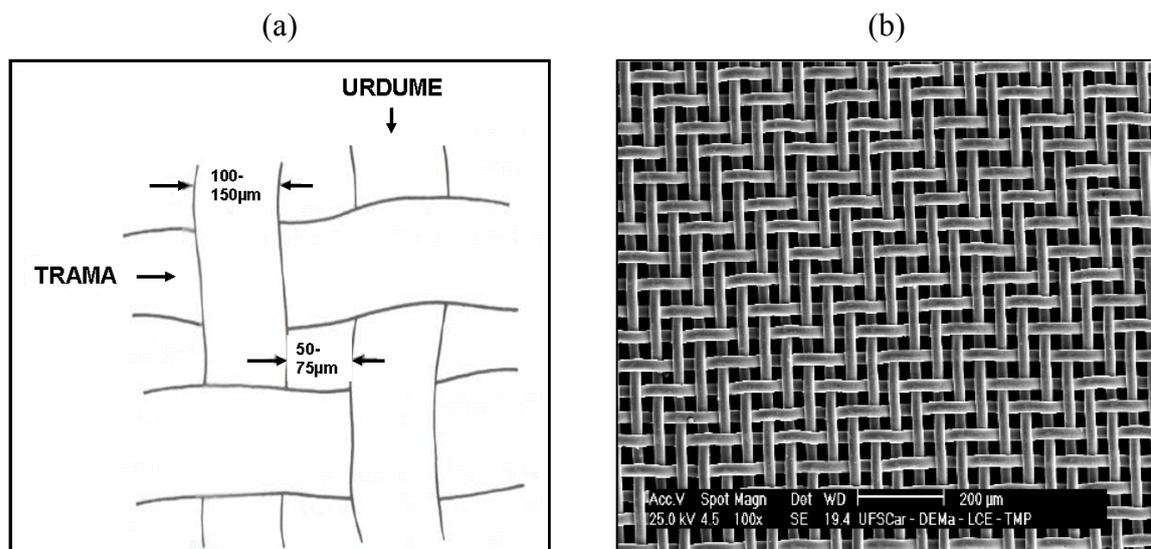
Fonte: DONOVAN, 1985.

As fibras dos tecidos utilizados na confecção dos filtros de mangas podem ser de forma trançada ou não trançada. Conforme a norma ABNT/TB-392, o tecido trançado é produzido pelo entrelaçamento de um anexo de fios arranjados no comprimento do tecido e outro conjunto de fios dispostos na largura do tecido, formando ângulo de aproximadamente 90°. O conjunto de fios que percorrem longitudinalmente em um plano e forma a estrutura básica do tecido trançado denomina-se urdume. Já o fio entrelaçado ao urdume corresponde à trama (NUNES, 2011). Na Figura 2.5 é

apresentada a estrutura do tecido plano e a estrutura do tecido trançado gerada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Os tecidos resultantes em um único grupo de fios entre si podem ser classificados pela gramatura, por ligamentos e pela resistência ao estouro da fibra (ABINT, 2012). Grande parte das fibras trançadas oferece baixa resistência ao fluxo do gás e são utilizadas em sistemas que atuam a baixas vazões, como as operações de limpeza por fluxo de ar reverso ou por vibração mecânica (RODRIGUES, 2004; TANABE, 2011; CERON, 2012). Para operações de limpeza por pulso de ar o uso tecido trançado é restrito, devido o desgaste da fibra pelos pulsos de alta energia (AZEVEDO, 2009).

Figura 2.5 - Estrutura de um (a) tecido plano e (b) estrutura da superfície do tecido trançado gerado no MEV com ampliação de 100x.



Fonte: NUNES, 2011.

Fonte: TANABE, 2011.

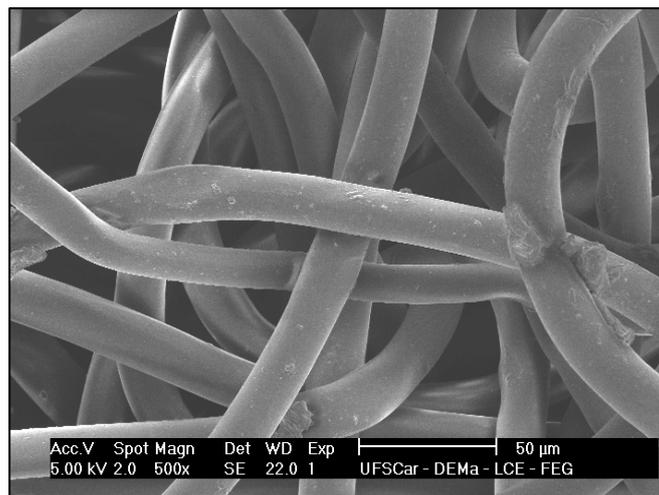
Além dos tecidos trançados existem no mercado tecidos não trançados ou feltros. Os tecidos não trançados são muito aplicados em operações de filtração de gases para filtros de mangas em que a etapa de limpeza realiza-se por pulso de ar reverso, por apresentarem mais poros por unidade de área e exigirem alta energia na etapa de limpeza da torta de filtração (THEODORE e BUONICORE, 1988; TANABE, 2008; SALEEM *et al.*, 2011; CERON, 2012).

Segundo a ABINT (2012), os feltros podem ser identificados através dos métodos: gramatura, espessura, densidade relativa, tipo de fibra ou filamento, resistência ao calor, contato com a chama, análise por solvente e acabamento da superfície. Quanto à gramatura (peso por unidade de área) pode ser classificado por: leve: menor que 25 g/m²; médio: entre 26 e 70 g/m²; pesado: entre 71 e 150 g/m²; e muito pesado: maior que 150 g/m².

Tecidos não trançados apresentam tratamentos como a calandragem e o chamuscamento. A calandragem garante uma superfície mais lisa e uniforme, com menos fibras soltas e maior facilidade no desprendimento de partículas. Além disso, aumenta a densidade do tecido, evitando alterações dimensionais quando exposto a temperaturas elevadas (DONOVAN, 1985). Já o chamuscamento facilita o desprendimento das partículas através da queima as fibras superficiais evitando que as fibras sejam incorporadas à torta de filtração (ABINT, 2012).

De acordo com a norma NBR-13370, o tecido não trançado é uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída por uma manta (uma ou mais camadas) de fibras ou filamentos, orientados direcionalmente ou ao acaso, consolidados por processo mecânico (fricção) e/ou químico (adesão) e/ou térmico (coesão) e a combinação desses processos (ABINT, 2012). Na Figura 2.6 é apresentada a estrutura da superfície de um tecido não trançado.

Figura 2. 6 - Estrutura da superfície do tecido não trançado.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

BINNING *et al.* (2009) investigaram a penetração direta das partículas e a eficácia da filtração utilizando feltros agulhados de espessura 1,5 mm. Posteriormente à liberação de partículas armazenadas no meio filtrante após 20.000 ciclos, observou-se um aumento no envelhecimento do filtro e na quantidade de material particulado dentro dos feltros. Isso levou ao acréscimo da eficiência de coleta do meio filtrante de 10%, após 5.000 ciclos, a 20%, após 20.000 ciclos de filtração e limpeza.

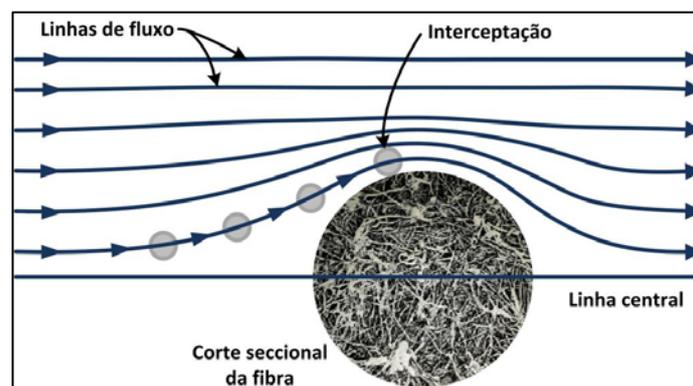
2.3. Mecanismos de deposição de partículas

As partículas de aerossol podem-se depositar sobre uma fibra do meio filtrante, por cinco mecanismos básicos: interceptação direta, impactação inercial, difusão, sedimentação gravitacional e ação eletrostática. Estes mecanismos formam um conjunto de tipos de deposição sobre um filtro de ar (HINDS, 1998) e são importantes para as primeiras etapas da filtração (MATESON e ORR, 1987). Estes serão descritos a seguir.

Interceptação direta: ocorre quando uma partícula colide com aderência na fibra do tecido, sem se desviar para fora do fluxo da circulação. Esse efeito acontece em partículas de tamanho superior a 1 micron. É o único mecanismo que não tem como resultado o afastamento da partícula do gás (HINDS, 1998). Um esquema representativo deste mecanismo pode ser visto na Figura 2. 7.

Na interceptação direta, as partículas possuem raio maior que o espaçamento entre as fibras, retendo-se no tecido e seguindo a mesma trajetória do fluxo original (THEODORE, 2008).

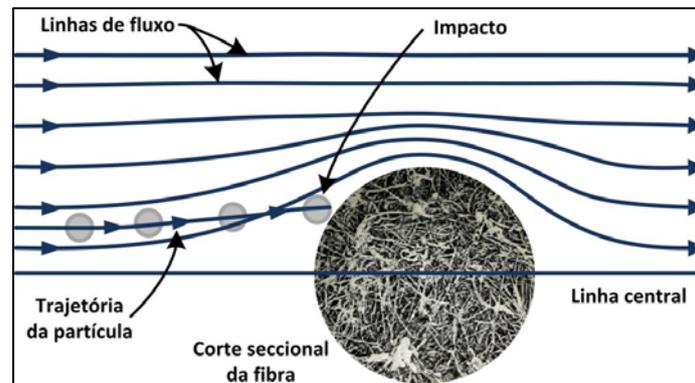
Figura 2. 7 Desenho esquemático da captura de partículas por interceptação direta.



Fonte: Adaptado de HINDS, 1998.

Impactação inercial: admite-se que as partículas possuem massa finita. A presença de um corpo no caminho do escoamento produz uma curvatura nas linhas de corrente, seja ela uma fibra ou uma esfera. As partículas são projetadas de suas linhas de corrente originais por ação inercial e se chocam com o corpo coletor, podendo ou não se depositar em sua superfície (DULLIEN, 1989). A Figura 2. 8 ilustra o mecanismo de impactação inercial.

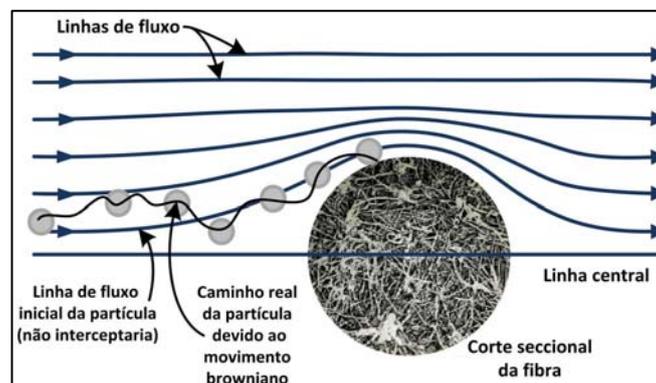
Figura 2. 8 – Desenho esquemático da captura de partículas por impactação inercial.



Fonte: Adaptado de HINDS, 1998.

Difusão ou Movimento Browniano: as linhas de corrente não coincidem com a trajetória das partículas, pelo fato destas serem pequenas, com o diâmetro menor que 1 μm e influenciarem no movimento Browniano. Neste mecanismo de captura as forças inerciais tornam-se cada vez menos ativas e apresentam velocidades baixas de filtração, além disso, podem ser influenciadas pelo bombardeamento de moléculas de gás que afetam o caminho da partícula até colidir com a fibra (HINDS, 1998). Na Figura 2. 9 é mostrado um esquema de captura de partículas por difusão.

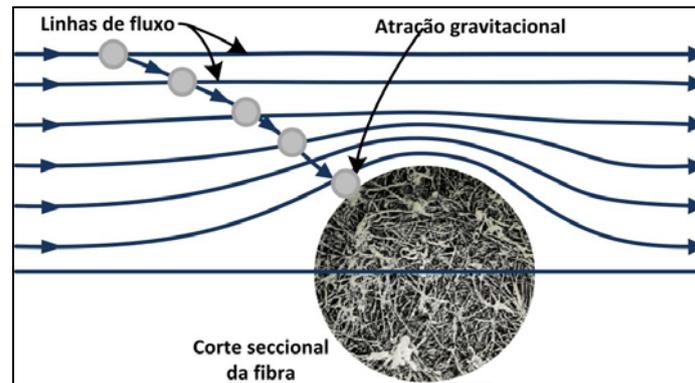
Figura 2. 9 – Desenho esquemático da captura de partículas por difusão.



Fonte: Adaptado de HINDS, 1998.

Sedimentação gravitacional: é resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, característico de partículas grandes (maiores que 30 μm), que causam um desvio da trajetória normal (HINDS, 1998). A eficiência deste mecanismo de captura de partícula depende da direção do fluxo. Quando o fluxo acontece de cima para baixo a eficiência é maior. Na Figura 2.10 este mecanismo é apresentado de forma esquemática.

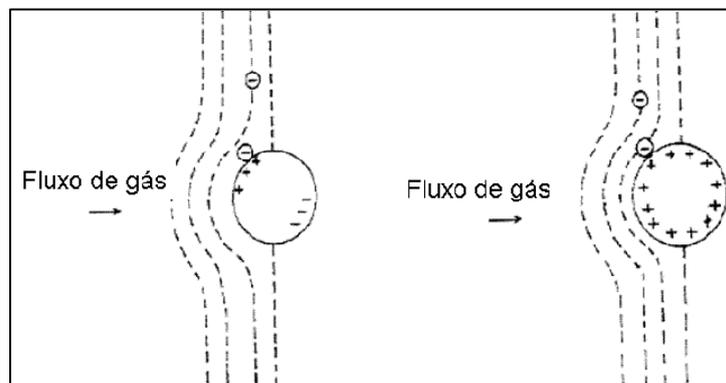
Figura 2.10 – Desenho esquemático da captura de partículas por ação gravitacional.



Fonte: Adaptado de HINDS, 1998.

Outro mecanismo importante para a operação de filtração é a ação de *forças eletrostáticas*, que ocorre principalmente em precipitadores eletrostáticos, devido à presença de cargas elétricas nos meios filtrantes, formando campo elétrico externo. O aumento da carga das partículas e fibras aumenta a eficiência de recolhimento de partículas pelo tecido (HINDS, 1998). Na Figura 2.11 é mostrada a deposição de partículas por ação de forças eletrostáticas.

Figura 2.11 – Captura de partículas por deposição eletrostática.



Fonte: TOGNETTI, 2007.

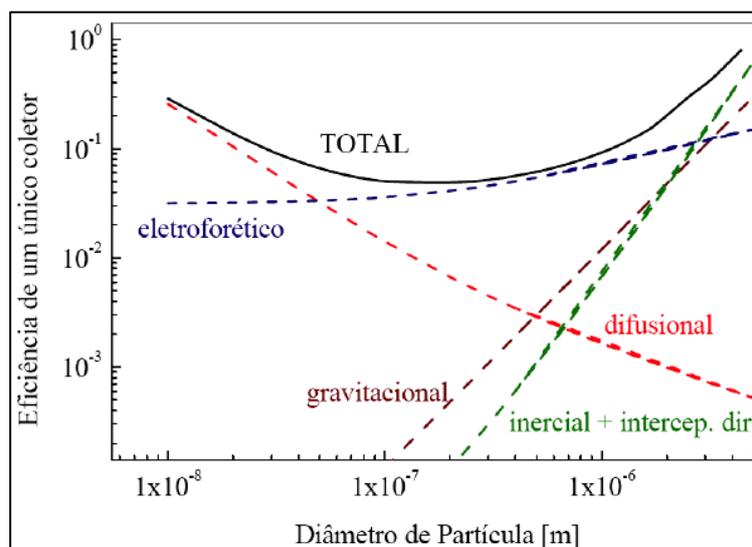
RODRIGUES (2005) verificou a influência de cargas eletrostáticas das partículas na eficiência de coleta nos estágios iniciais da filtração. O autor observou que a eficiência de coleta do filtro apresentou-se sensível à variação das cargas das partículas. Mediante a eletrização das partículas houve então o aumento da eficiência e o decréscimo da queda de pressão.

Na Figura 2.12 é mostrada esquematicamente a eficiência de coleta dos mecanismos de captura de partículas mencionados em relação ao diâmetro de partícula. De acordo com esta figura, pode-se observar que a eficiência de coleta sofre variação em função do diâmetro das partículas e que os mecanismos de captura de partículas por ação gravitacional, inercial e interceptação direta são mais presentes na captura de partículas maiores que 2 μm . Logo o mecanismo eletroforético (ligado à ação de forças eletrostáticas) e o difusional (associado ao movimento Browniano) têm maior influência em partículas menores que 2 μm .

A eficiência de captura de particulados pode ser obtida pela soma das eficiências de cada mecanismo atuante:

$$\eta_T = \eta_D + \eta_{ID} + \eta_I + \eta_G + \eta_E \quad (2.1)$$

Figura 2.12 – Mecanismos de coleta e eficiência dos mesmos.



Fonte: COURY, 1983.

2.4. Mecanismos de remoção de partículas

A técnica de remoção de partículas é a diferença básica entre os vários equipamentos de filtro de manga existentes. O ciclo de limpeza tem grande importância no comportamento do meio filtrante e a maioria dos estudos a respeito desta operação tem concentrado seus esforços em conhecer os mecanismos específicos para cada técnica de limpeza utilizada, pelos quais as forças são induzidas no filtro (RODRIGUES, 2006).

As operações de limpeza dos meios filtrantes têm três objetivos: a limpeza física das membranas e dos demais componentes (ausência de impurezas visíveis), limpeza química (remoção de depósitos e incrustações), limpeza biológica (eliminação de microrganismos viáveis). Por isso, a operação de limpeza pode ter influência direta sobre o desgaste da fibra do meio filtrante.

As técnicas mais comuns para remoção do material particulado após a filtração são: agitação (vibração mecânica), fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso; nas quais cada ciclo de limpeza é controlado por um temporizador como um sensor de pressão. Essas técnicas mais utilizadas estão brevemente descritas a seguir.

Limpeza por agitação ou vibração mecânica: liberação do pó coletado pela superfície do filtro de tecido por meio de uma montagem simples através de um motor que provoca uma vibração entre as mangas. Geralmente, a frequência e a ampliação da vibração é que promovem a limpeza. Esta técnica requer a interrupção da operação de filtração por 5 minutos durante a remoção de partículas e pode provocar oscilação nos elementos filtrantes (MARTINS, 2001).

Limpeza por fluxo de ar reverso: o ar limpo é carregado até as mangas por um soprador em direção contrária a operação de filtração para remoção das partículas. Este mecanismo de limpeza é mais usado em operações contínuas (BARROS, 2010).

Limpeza por pulso de ar reverso: o ar limpo é pulsado em forma de um jato a alta pressão até as mangas em direção oposta a operação de filtração. Esse pulso de ar causa expansão das mangas, desprendendo a torta filtrante. Este foi o mecanismo de limpeza para a operação de remoção de particulados utilizada neste trabalho. Portanto, a seguir encontram-se mais informações sobre ele.

Na Tabela 2.2 são apresentados os mecanismos de remoção de material particulado utilizados na limpeza de filtros de manga.

Tabela 2.2 – Mecanismos de limpeza.

Mecanismos de limpeza	Uniformidade da limpeza	Tipo de tecido	Velocidade de filtração	Custo do equipamento	Custo de energia	Carga de poeira
<i>Fluxo de ar reverso</i>	Boa-Média	Trançado	Média	Médio	Médio-baixo	Média
<i>Pulso de ar reverso</i>	Muito boa	Trançado	Alta	Alto	Alto	Alta
<i>Vibração mecânica</i>	Boa	Feltro	Média	Médio	Médio-baixo	Média
<i>Manual</i>	Boa	Trançado	Média	Baixo	–	Baixa
		Feltro				

Fonte: THEODORE e BUONICORE, 1988.

O resultado destes mecanismos de limpeza está relacionado ao acréscimo da queda de pressão residual, pois este parâmetro será sempre superior no meio filtrante utilizado em relação ao que não foi utilizado (DONOVAN, 1985). Com o aumento da torta de filtração, conseqüentemente, observa-se o aumento da queda de pressão. Para manter as propriedades do meio filtrante deve-se fazer a limpeza do mesmo, e, posteriormente à limpeza, uma queda de pressão residual é observada (ALLEN *et al.*, 1999). Com a realização de vários ciclos de filtração e limpeza pode-se verificar o aumento linear da queda de pressão residual com o número de ciclos (LO *et al.*, 2010).

2.4.1. Remoção de partículas por pulso de ar reverso

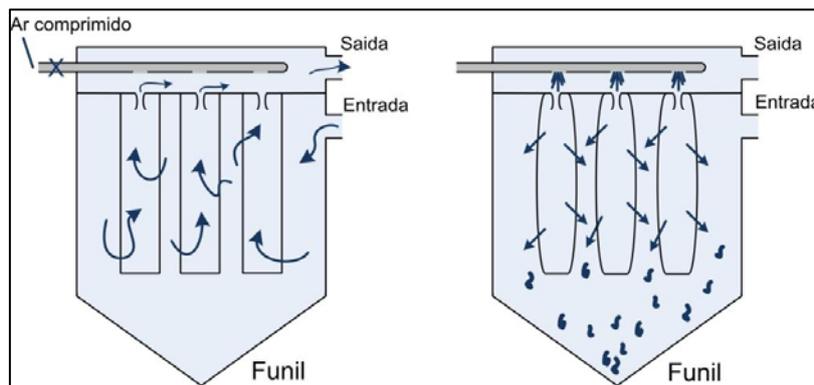
O mecanismo de limpeza de tecidos por pulso de ar reverso tem crescido consistentemente em popularidade, por operar à queda de pressão constante e ocupar menor espaço em relação às demais técnicas. A operação de limpeza por pulso de ar reverso depende do meio filtrante, da porosidade da torta de filtração, da resistência específica da torta de filtração, da distribuição do material particulado por unidade de área do meio filtrante e da velocidade de filtração (SALEEM *et al.*, 2011).

Na indústria utiliza-se muito esta técnica para remover as partículas dos filtros de manga devido à alta eficiência de remoção e a não necessidade de interromper a operação de filtração, contribuindo assim na regeneração do meio filtrante em tempo real (SIMON *et al.*, 2010; PARK *et al.*, 2012).

Em operações de filtração os pulsos de ar de limpeza são geralmente introduzidos quando a queda de pressão máxima é atingida, assim, através da limpeza a pressão mínima é alcançada e a filtração continua (KAVOURAS e KRAMMER, 2005).

A operação cíclica de pulso de ar reverso consiste em uma fase da filtração e uma fase de limpeza. Normalmente, o período de duração do primeiro ciclo é maior que o segundo ciclo de filtração e limpeza, assim pode-se atribuir o tempo de filtração como o tempo de ciclo de filtração e limpeza (JU *et al.*, 2001). Na Figura 2.13 é apresentada a operação de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 2. 13 – Desenho esquemático da operação (a) de filtração do meio filtrante e (b) de limpeza do meio filtrante por pulso de ar reverso.



Fonte: Adaptado de JU *et al.*, 2001.

Nos sistemas de coleta de pó com limpeza dos meios filtrantes por pulso de ar reverso, um rápido jato de ar é dado em milissegundos, em direção oposta ao fluxo normal de ar com partículas suspensas. Esses fluxos são separados por um tecido filtrante. O pulso de ar reverso durante a limpeza produz uma onda de choque que flexiona o tecido e remove a camada formada pela deposição do pó no tecido que desaba no cone do filtro. Desta forma, retira-se grande parte da torta filtrante formada durante a filtração. Essa operação garante a reutilização do mesmo tecido filtrante durante muitas operações de filtração e previne o alto consumo de energia (KOCH *et al.*, 1996). Ou seja, esta operação retira partículas da superfície do meio filtrante,

reduzindo assim a queda de pressão e a resistência do meio filtrante (SIMON *et al.*, 2010).

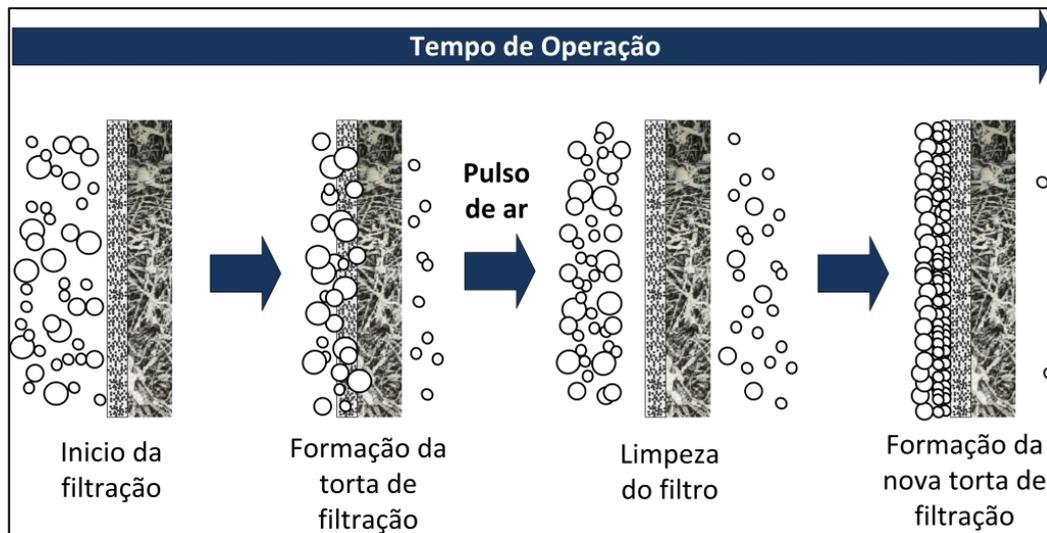
Nessa técnica utilizam-se normalmente feltros como meio filtrante e possibilita-se maior relação ar-tecido por meio da limpeza periódica dos filtros. Além disso, ela está relacionada à ação de forças intermoleculares, ou seja, quanto menores forem essas forças de adesão entre partículas, maiores as eficiências apresentadas na operação de limpeza (SIMON *et al.*, 2007). Por isso, para a torta de filtração ser removida, a pressão tem que ser alta o suficiente para superar a força de adesão entre a torta e o meio ou a coesão interna da torta (CHI *et al.*, 2008; BINNIG *et al.*, 2009). Portanto, a operação de limpeza por pulso de ar reverso torna-se eficaz quando as forças de deslocamento são superiores as forças de adesão torta-meio filtrante (SIMON *et al.*, 2010).

De acordo com ELLENBECKER e LEITH, 1983, a eficiência da limpeza por pulso de ar reverso é igual à fração de massa removida por unidade de área dividida pela massa retida após a limpeza por unidade de área. Deste modo, a massa de pó sobre o tecido antes da limpeza é inversamente proporcional a eficiência com o qual o pulso remove o pó do tecido filtrante.

Pressões de pulso mais elevadas melhoram a eficiência de limpeza quando comparado a tempos de pulso mais longos, devido às forças superiores de separação que ocorrem no interior do meio filtrante. Por outro lado, pressões muito altas durante a limpeza podem danificar o elemento filtrante (BERBNER e PILZ, 1996).

O aumento da eficiência de coleta ao longo do tempo de filtração é dado principalmente pelas partículas que foram obstruídas na superfície do meio filtrante e pela colisão com as partículas depositadas na filtração. As partículas depositadas são removidas para fora da superfície por ação da operação de limpeza por pulso de ar. No entanto, as partículas são rearranjadas na superfície do meio filtrante, formando a torta de filtração e resultando no acréscimo da eficiência de captura de partículas (PARK *et al.*, 2012). Na Figura 2.14 é apresentado esquematicamente este comportamento de aumento da eficiência consequente da limpeza por pulso de ar.

Figura 2. 14 – Ilustração do mecanismo de limpeza por pulso de ar.



Fonte: Adaptado de PARK *et al.*, 2012.

Os ciclos de filtração e limpeza podem ser relacionados ao sucesso da limpeza por pulso de ar reverso, levando ao desequilíbrio da resistência específica da torta de filtração e o entupimento do meio filtrante (SIMON *et al.*, 2010). O elemento chave deste mecanismo de limpeza é o pulso de ar dado em direção contrária ao fluxo de ar da filtração (CHI *et al.*, 2008). Já o sucesso da filtração após a limpeza depende da maneira como ocorre a deposição das partículas na superfície do filtro e de como foi aplicada a limpeza durante o condicionamento. Assim, pode-se dizer que a ação de limpeza foi suficiente, à medida que a queda de pressão residual continua a aumentar de ciclo para ciclo de filtração (SCHILDERMANS e BAEYENS, 2005).

A operação de filtração mantém seu funcionamento no momento da etapa de remoção de partículas por pulso de ar reverso, garantindo a realização em sequência de vários ciclos de filtração e limpeza. De acordo com SALEEM e KRAMMER (2007) esta técnica é rápida, intensa e contínua, e o bom funcionamento do meio filtrante é considerado vital para o desempenho desta operação.

Deste modo, o desempenho da limpeza por pulso de ar reverso depende da estrutura e da uniformidade da camada de pó acumulado, e, portanto, relacionar esta operação aos parâmetros operacionais que caracterizam os efeitos do desempenho do meio filtrante é de grande importância (KANAOKA e AMORNKITBAMRUNG, 2001). São esses parâmetros operacionais a pressão de ar pulsante, a duração do pulso, o

diâmetro da injeção de ar comprimido, a velocidade de filtração e a concentração de material particulado (SALEEM e KRAMMER, 2007; PARK e LIM, 2009).

A torta de filtração leva ao aumento da queda de pressão no início dos ciclos de filtração e à necessidade da sua remoção em intervalos de tempo pré-definidos. Portanto, a formação e o desprendimento da torta de filtração são indispensáveis, assim como a alta pressão do pulso de limpeza, uma vez que o pulso de ar reverso à pressão muito baixa remove partículas de forma irregular, sendo incapaz de fornecer a força necessária para separar a torta (SALEEM *et al.*, 2011).

A captura de partículas ocorre de forma mais definida em tecidos novos e diminui acentuadamente quando o tecido é limpo por pulso de ar reverso (GINESTET e PUGNET, 2012).

O principal fator que apresenta relação com a porosidade e na resistência específica da torta é a compactação da torta de filtração, pois os filtros que apresentam maior resistência ao fluxo formam tortas mais compactadas (LUPION *et al.*, 2012).

2.4.2. Estudos envolvendo pulso de ar reverso

HINDY (1986), através de estudos experimentais, investigou a duração do ciclo de filtração, a queda de pressão e a quantidade de partículas de saída durante a limpeza. Nesse estudo ele fixou a queda de pressão em 1500 Pa e 2500 Pa e 1 min entre os pulsos de limpeza. O autor verificou que o tempo do pulso utilizado causou um rápido aumento na massa de pó por unidade de área depositada sobre o tecido e também um aumento na queda de pressão através do filtro. A maior concentração de partículas após a limpeza foi observada durante a operação de queda de pressão máxima de 1500 Pa. Sendo assim, mais favorável o desempenho da filtração e limpeza por pulso de ar reverso a 2500 Pa.

ALLEN *et al.* (1999), com base em trabalhos anteriores por pulso de ar reverso em limpeza de filtros de mangas, utilizaram recursos da modelagem matemática para descrever a propagação do pulso durante a operação de limpeza. No decorrer da deposição das partículas na superfície externa do meio filtrante, a queda de pressão aumenta, devido à formação da torta de filtração e, portanto, esta deve ser removida. A

dinâmica do tecido durante a limpeza foi investigada com base na aplicação de um curto pulso de ar, de alta intensidade, em um período de 4 minutos entre os filtros de condições industriais. Neste estudo foi apresentada a hipótese de que o tempo necessário para atingir a pressão máxima deve ser igual ao do tecido se expandindo. Assim, foi possível elaborar a resolução de equações diferenciais para o movimento do tecido, o que resultou na bem sucedida modelagem de processo. Os autores concluíram que esta modelagem pode ajudar na otimização do meio filtrante, através das equações que permitiram calcular a máxima tensão no interior da torta de filtração.

SIMON *et al.* (2007), através de investigações experimentais em filtros com limpeza por pulso de ar reverso, destacaram o fator que aumenta potencialmente a deposição de partículas. Neste estudo, a deposição das partículas no interior dos meios filtrantes foi estabilizando após 200 ciclos de filtração e limpeza. Nos primeiros ciclos de filtração e limpeza a queda de pressão residual permaneceu praticamente constante, e a medida que o número de ciclos aumentava, a queda de pressão residual ia sofrendo um lento acréscimo. O fenômeno de acúmulo de pó no filtro foi observado na zona de 2-3 cm na qual a limpeza não ocorreu.

MUKHOPADHYAY e DHAWAN (2009) observaram que com o tempo de filtração, tanto a penetração de partículas e a queda de pressão tendem a aumentar, sem afetar o diâmetro de partícula (PM 2,5). Neste estudo experimental, os autores concluíram que com o aumento da proporção de ar de entrada, a primeira penetração de partículas aumenta, em seguida, esta diminui, enquanto a queda de pressão aumenta constantemente. As partículas de diâmetro médio PM 2,5 não foram afetadas pela relação ar-filtro. Com o aumento do tempo do pulso, a penetração das partículas também tendeu a diminuir até certo nível, mas ocorreu um aumento constante da queda de pressão residual.

SUH *et al.* (2011) construíram em escala piloto um filtro de manga com limpeza por pulso de ar com área de filtração de 6 m², para investigar a teoricamente e empiricamente a queda de pressão em diferentes parâmetros operacionais, como a velocidade de filtração, a pressão do pulso, a quantidade de pó, o tempo de pulso, e a distância de injeção do pulso. Os autores observaram que o modelo empírico apresentou boa concordância com os dados experimentais, mostrando um coeficiente de correlação de 0,952. Portanto, estes concluíram que o modelo empírico mostrou bom desempenho na previsão da queda de pressão.

CHOUHARY e DWIVEDI (2012) verificaram as interações na operação de filtração por pulso de ar entre a velocidade de filtração, a pressão do pulso e a densidade do feltro através da queda de pressão em função do tempo de filtração. Os autores observaram que, com valores máximos a queda de pressão aumentou lentamente nos instantes iniciais da filtração e, após um tempo de filtração o aumento foi mais rápido. Também concluíram que a queda de pressão residual aumentou ao longo do ciclo.

PARK *et al.* (2012) observaram a importância em conhecer as melhores condições do meio filtrante, por este ser um dos componentes mais importantes na operação contínua de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Assim, estes autores estudaram a penetração de partículas utilizando uma condição da operação de filtração e limpeza e investigaram a relação entre a penetração de partículas no meio filtrante e a queda de pressão neste meio. Na fase inicial da filtração, os resultados mostraram uma eficiência de captura de 80% para partículas de 0,45 μm e uma eficiência de captura de 99,9% em queda de pressão superior a 20 mmH₂O. Verificaram também que a queda de pressão residual após a limpeza do meio filtrante foi mantida menor que a queda de pressão máxima e que a penetração das partículas dependem do tamanho das partículas, ou seja, com o tamanho reduzido das partículas, a eficiência de captura das partículas diminui, devido ao menor efeito da impactação durante a filtração.

Neste contexto, a principal contribuição deste trabalho de Mestrado no estudo do processo de filtração por pulso de ar reverso, foram a investigação experimental do desempenho dos ciclos de filtração e a regeneração dos meios filtrantes após serem submetidos a 200 ciclos de filtração e limpeza, além da obtenção da massa retida, da massa depositada, da massa desprendida, da resistência específica da torta, da porosidade da torta de filtração, da permeabilidade do meio filtrante, e das mudanças provocadas neste meio filtrante, pelo pulso de ar reverso, verificadas por meio das imagens geradas no Microscópio Eletrônico de Varredura.

2.5. Aspectos relevantes no estudo da filtração de gases

A queda de pressão no filtro, a velocidade de filtração, a porosidade da torta de filtração e do meio filtrante, a resistência específica da torta de filtração, a

permeabilidade do meio filtrante e a fração removida das partículas após a limpeza são parâmetros de grande importância na filtração de gases. Estes são apresentados a seguir.

2.5.1. Queda de pressão no Filtro de Mangas

A queda de pressão ou a perda de carga é um parâmetro importante na operação de filtração e o aumento da queda de pressão no filtro é dado pelo acúmulo de partículas no meio filtrante, tornando-se necessária a limpeza frequente do material coletor de particulados.

A queda de pressão total (ΔP_T) no filtro de mangas é a diferença entre a pressão de entrada no filtro e a pressão de saída que atravessa o filtro. A queda de pressão total no filtro também pode ser definida pela somatória das pressões:

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (2.2)$$

em que ΔP_M é a queda de pressão no meio filtrante; ΔP_C é a queda de pressão da torta de filtração.

Como a espessura do meio filtrante se mantém constante durante a operação de filtração, tem-se a queda de pressão no meio filtrante como:

$$\Delta P_M = \kappa_M V_F \quad (2.3)$$

Em que κ_M é a resistência específica do meio filtrante; V_F é a velocidade de filtração.

Já durante a formação da torta de filtração, a espessura do meio filtrante altera-se, devido à presença da espessura da torta de filtração L_C , e esta não é constante. Mas pode ser calculada pela massa de material particulado depositado por unidade de área

(W), conhecendo-se a densidade de partícula (ρ_p) e a porosidade da torta (ε), conforme mostra a equação:

$$L_C = \frac{W}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.4)$$

Considerando, o escoamento de um fluido incompressível viscoso, pode-se aplicar a equação de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{\kappa_1} V_F \quad (2.5)$$

Sendo que, ΔP é a queda de pressão na direção do escoamento; μ é a viscosidade do fluido; L é a espessura do filtro; κ_1 é a constante de permeabilidade Darciana.

Substituindo a Equação (2.4) na Equação (2.5), encontra-se a queda de pressão através do escoamento do gás pela torta de filtração (ΔP_C):

$$\Delta P_C = \kappa_C V_F W \quad (2.6)$$

Sendo κ_C a resistência específica da torta (LEITH e ALLEN, 1986), tem-se:

$$\kappa_C = \frac{\mu}{\kappa_1 \rho_p (1-\varepsilon)} \quad (2.7)$$

Portanto, a queda de pressão total (ΔP_T) pode ser reescrita como:

$$\Delta P_T = V_F (\kappa_M + \kappa_C W) \quad (2.8)$$

Máximas eficiências necessitam de altas quedas de pressão (maior energia durante a operação de filtração), o que encarece a operação de filtração. Na literatura podem-se encontrar muitos trabalhos que verificaram a queda de pressão não linear utilizando filtros de tecido como meio filtrante. Normalmente, a resistência específica da torta é assumida constante, por depender da porosidade. E, como a porosidade é um parâmetro muitas vezes desconhecido teoricamente e as equações para estimar a resistência específica da torta são pouco utilizadas, na maioria das vezes utilizam-se valores experimentais (SILVA *et al.*, 1999).

Deste modo, pode-se obter a resistência específica da torta experimentalmente pelo aumento da queda de pressão no meio filtrante através do acúmulo de material particulado no meio filtrante (LEITH e ALLEN, 1986), como mostra a Equação (2.9):

$$\kappa_{C \text{ Experimental}} = \left(\frac{A}{V_F} \right) \left(\frac{\Delta P}{\Delta M} \right) \quad (2.9)$$

Em que:

κ_C : resistência específica da torta (s^{-1});

A : área de filtração (m^2);

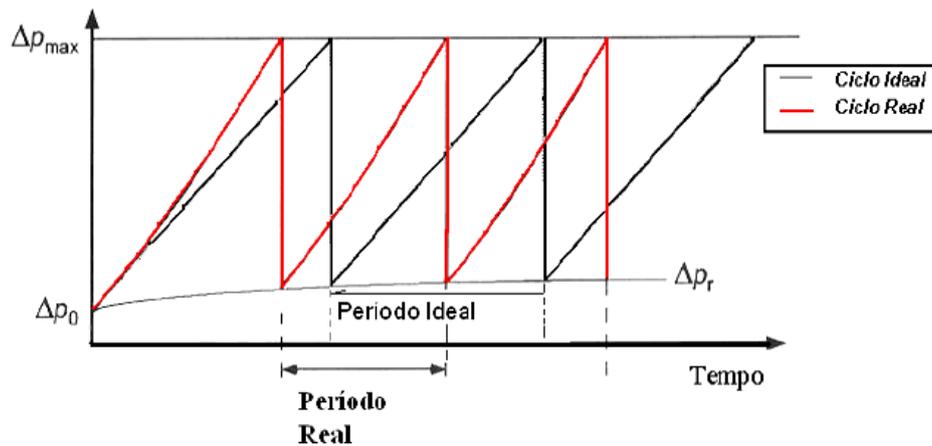
V_F : velocidade de filtração (m/s);

ΔP : queda de pressão nos pontos 1 e 2 da parte linear da curva de filtração (Pa);

ΔM : massa acumulada por unidade de área nos pontos 1 e 2 (Kg/m^2).

De acordo com a norma VDI 3926 (2003), o comportamento ideal dos ciclos de filtração deve ser uniforme. Na Figura 2.15 é ilustrado o comportamento real e ideal do parâmetro queda de pressão em função do tempo dos ciclos de filtração (OSORIO, 2006).

Figura 2.15 - Comportamento real e ideal da perda de carga em função do tempo de filtração.



Fonte: Adaptado de OSORIO, 2006.

Nas primeiras camadas ocorre a maior queda de pressão no filtro e permanecem durante os ciclos de filtração. Parâmetro como a granulometria é fator determinante no perfil de queda de pressão durante os ciclos de filtração, assim como a deposição de partículas ou impurezas.

Em operações de filtração com amplas faixas granulométricas tende-se a produzir altos valores de queda de pressão e eficiências mais baixas na limpeza do filtro, devido à localização de partículas nas camadas mais profundas do meio filtrante (BOTARI e BERNARDO, 2009).

O aumento da queda de pressão residual ocorre em função da deposição das partículas no elemento coletor, devido à diferença de pressão verificada através dos sensores diferenciais de pressão da unidade experimental. A diferença de pressão (ΔP) é importante na remoção de particulados aderidos ao filtro por pulso de ar reverso. Na operação de regeneração do meio filtrante utilizando o pulso de ar reverso a ocorrência do pulso de ar pode ocorrer em intervalo de tempo uniforme ou quando a queda de pressão no meio filtrante é maior que o valor definido (SUH *et al.* 2011).

2.5.2. Porosidade dos meios filtrantes

Assim como a queda de pressão, a porosidade do meio filtrante é um parâmetro fundamental de operação de filtração. A porosidade mede a quantidade de espaços vazios no meio filtrante e tem grande importância na escolha do mesmo. Também vale destacar que quanto maior a porosidade do meio filtrante, maior é a quantidade de partículas que se podem depositar no seu interior (TANABE, 2011).

O aumento da queda de pressão se deve pela redução da porosidade do meio filtrante. Conseqüentemente aumenta-se a energia necessária pelo processo de filtração/limpeza e diminui-se a resistência do tecido (AZEVEDO, 2009).

Das correlações existentes na literatura, a Equação de Ergun (1952) é uma das mais utilizadas na determinação da porosidade dos meios filtrantes (FARGNOLI, 2010), como mostra a seguir:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1 - \varepsilon_{MP})^2 \mu V_F}{\varepsilon_{MP}^3 d_p^2} + \frac{1,75(1 - \varepsilon_{MP}) \rho_G V_F^2}{\varepsilon_{MP}^3 d_p} \quad (2.10)$$

Sendo que nesta equação:

d_p : é o diâmetro médio das partículas;

ρ_G : é a densidade do gás;

ε_{MP} : é a porosidade do meio poroso;

V_F : é a velocidade de filtração;

L : é a espessura da camada porosa.

2.5.3. Porosidade da torta de filtração

Existem dois métodos utilizados na determinação da porosidade da torta de filtração, o método direto e o método indireto. O método indireto consiste na utilização de equações encontradas na literatura como a Equação de Ergun. O método direto consiste no uso de imagens da torta filtrante para obtenção da porosidade (AGUIAR e COURY, 1996).

A Equação Clássica de Ergun (1952) é utilizada para estimar a porosidade de um escoamento de fluido, utilizando a queda de pressão em um leito poroso, como mostrado na Equação (2.10). Isto é possível quando conhecidas a queda de pressão e a espessura da torta de filtração.

A espessura da torta de filtração pode ser determinada por:

$$M_T = Qt = LA_C \rho_P (1 - \varepsilon) \quad (2.11)$$

Em que:

M_T : massa da torta de filtração;

Q : vazão mássica de pó;

A_C : área superficial da torta de filtração;

ρ_P : densidade de partículas;

t : tempo de filtração.

Isolando-se a espessura da torta de filtração na Equação (2.11) e substituindo na Equação (2.10), tem-se a Equação de Ergun Modificada (2.12):

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150Q\mu V_F(1-\varepsilon)}{A_C \rho_P d_P^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75Q\rho_G V_F^2}{A_C \rho_P d_P} \frac{1}{\varepsilon^3} \quad (2.12)$$

A Equação (2.12) permite estimar a porosidade da torta de filtração a partir dos dados de ΔP em função do t , medidos experimentalmente (SILVA *et al.*, 1999).

Já o método direto possibilita estimar a porosidade da torta filtrante, através do processo prático realizado em várias etapas de preparo de amostra. AGUIAR (1995) determinou a porosidade pela técnica direta, através da obtenção de imagens da seção transversal das tortas de filtração de gases por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e, analisadas em programa de análise de imagens Image Pro Plus. Este procedimento desenvolvido por AGUIAR (1995) consiste nas seguintes etapas: pré-endurecimento da amostra, embutimento do tecido, seccionamento, esmerilhamento e polimento.

RODRIGUES (2006), por exemplo, observou o acúmulo de partículas nas camadas superiores do tecido e a diminuição das partículas com a profundidade. Esta observação foi possível por meio da utilização do procedimento desenvolvido por AGUIAR (1995). Este procedimento também permitiu verificar que o aumento do diâmetro de partículas resultou em maior profundidade de penetração e maior massa retida.

2.5.4. Velocidade de filtração

Altos valores de velocidade de filtração fazem com que o tempo de filtração diminua, entretanto, a penetração das partículas no tecido é maior, o que dificulta a remoção da camada de pó, aumentando a queda de pressão residual durante a filtração. Baixos valores de velocidade de filtração necessitam maior tempo de filtração e neste caso a interação partícula-tecido é menor, o que facilita a remoção da camada de pó (DONOVAN, 1985).

SALEEM *et al.* (2007), verificaram o efeito da velocidade de filtração na formação das tortas de filtração. Fixaram uma queda de pressão limite, e como esperado, a inclinação da curva de queda de pressão em função do tempo de filtração foi maior para maiores velocidades de filtração resultando na diminuição do tempo dos

ciclos de filtração. Esta redução do tempo dos ciclos foi atribuída ao aumento na resistência específica da torta com o aumento da velocidade de filtração.

2.5.5. Fração de massa removida

A fração removida é um dos parâmetros que melhor caracterizam a limpeza por pulso de ar reverso. E, este é dado pela massa desprendida dividida pela massa total (CALLÉ *et al.* 2002), como mostra a equação:

$$f_{MR} = \frac{M_D}{M_T} \quad (2.20)$$

Em que:

f_{MR} : fração de massa removida;

M_D : massa desprendida na limpeza;

M_T : massa total de pó no filtro, após a filtração.

Considerando como constante a velocidade de filtração durante toda operação de filtração e limpeza, tem-se a eficiência de limpeza (E_L), como apresenta a equação (ELLENBECKER e LEITH, 1983):

$$E_L = f_{MR} \cdot 100 \quad (2.21)$$

Sendo que E_L é a eficiência de limpeza em porcentagem.

As equações mostradas nesta seção foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho de mestrado, para analisar o desempenho dos meios filtrantes após a filtração e a limpeza por pulso de ar reverso. Assim como os trabalhos estudados, que permitiram a comparação de alguns resultados obtidos e a verificação de que este

trabalho pode fornecer boas contribuições pela avaliação e investigação desta tecnologia de filtração e limpeza e o comportamento dos meios filtrantes, perante a regeneração dos filtros e redução de custos das empresas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir encontram-se descritos os materiais utilizados nos ensaios de filtração e limpeza durante a realização deste trabalho. Estes materiais foram escolhidos por permitir a filtração por pulso de ar reverso em diferentes tipos de tecidos filtrantes, além de verificar o comportamento destes.

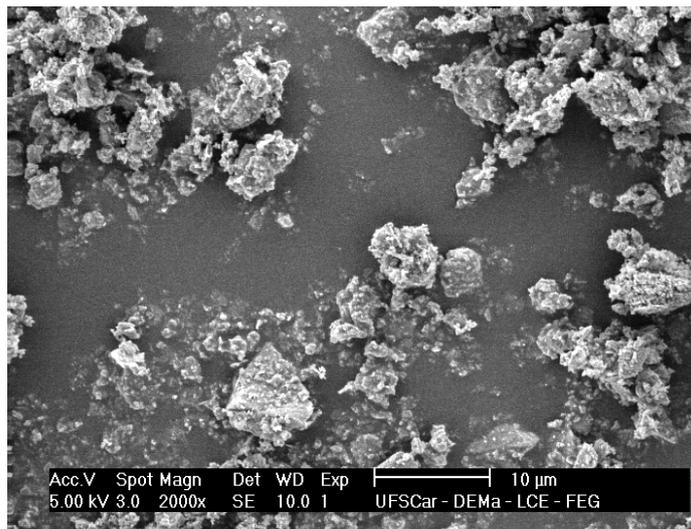
O trabalho foi realizado em duas etapas. Na primeira etapa foram realizados ensaios experimentais preliminares, com o objetivo de avaliar o desempenho do equipamento de pulso de ar reverso durante a filtração e limpeza dos filtros de tecido, utilizando como meios filtrantes o polipropileno e o acrílico.

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento dos experimentos de fato, com a finalidade de comparar os dois tecidos e discutir quanto ao comportamento de cada um perante a deposição das partículas, a resistência específica da torta, a permeabilidade do meio filtrante, a porosidade da torta de filtração e a fração removida após vários ciclos de filtração e limpeza.

3.1. Caracterização do material particulado

Para este estudo, o material particulado selecionado foi o concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), fornecido pela FOSFÉRTIL S.A. Na Figura 3.1 é apresentada uma imagem obtida pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

Figura 3. 1 - Material particulado rocha fosfática (aumento de 2000x), gerado no MEV.



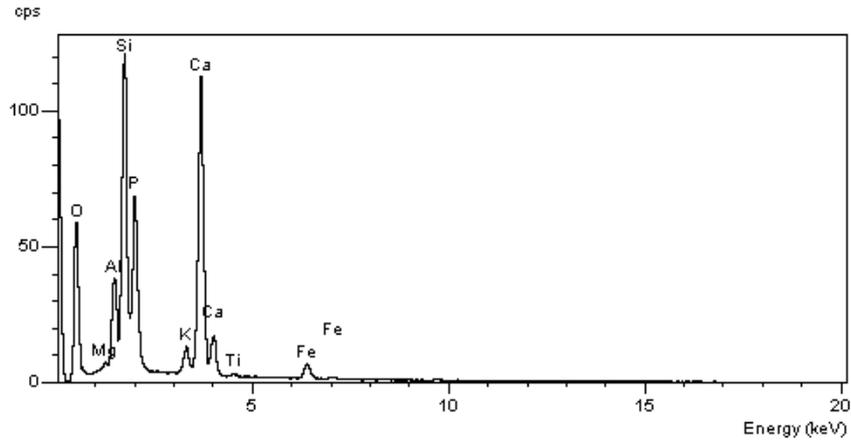
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A rocha fosfática é um pó extremamente fino de coloração amarelo palha e é utilizada principalmente como fertilizante. A exposição à rocha fosfática é caso de preocupação a saúde pública, principalmente por causar distúrbios respiratórios.

A composição química da rocha fosfática obtida no Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar, através da micro análise por Raio X foi à seguinte em termos percentuais: Oxigênio (74,14), Magnésio (0,22), Alumínio (2,86), Silício (8,73), Fósforo (5,13), Potássio (0,64), Cálcio (7,62), Titânio (0,08) e Ferro (0,56), como apresentada na Figura 3.2.

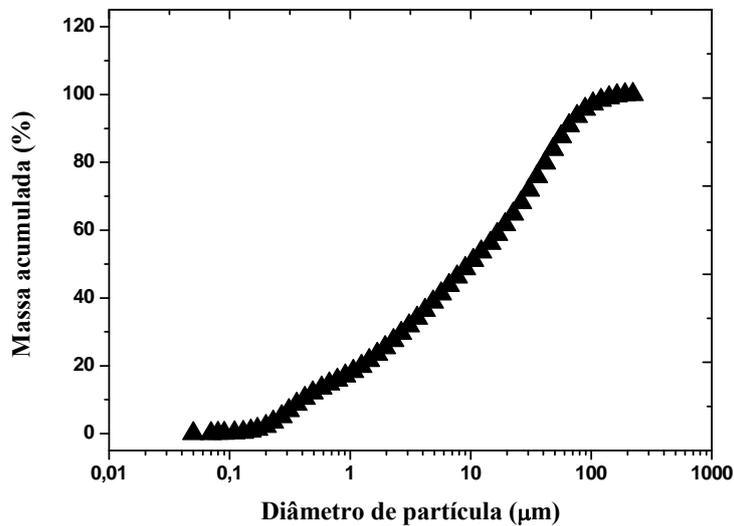
O concentrado fosfático é um material higroscópico e a umidade acima de 20 % causa empastamento no tecido, por isso antes da realização dos ensaios, este foi mantido em estufa a aproximadamente 70°C até o momento da filtração. Mesmo assim a rocha fosfática foi retirada da estufa e colocada imediatamente dentro da caixa acrílica evitando-se ao máximo o contato com o meio externo. Os critérios de seleção desse material se basearam na morfologia, distribuição granulométrica e densidade da rocha fosfática.

A densidade da rocha fosfática foi determinada por Picnometria a Hélio, no Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da UFSCar, pelo equipamento AccuPyc 1330 Micrometrics, obtido pela média de três análises e apresentou-se o volume de 2,56 cm³ e densidade da partícula de 3,03 g/cm³.

Figura 3. 2 - Micro análise da rocha fosfática.

Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 3.3 é representada a distribuição granulométrica do material particulado, realizado no DEQ/UFSCar, pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus pela media de três análises. O diâmetro médio volumétrico de partículas foi de 9,63 μm , ou seja, esse foi diâmetro de uma esfera com volume e densidade equivalente ao da partícula.

Figura 3. 3- Distribuição granulométrica do material particulado.

Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Através da distribuição granulométrica verificou-se a presença de partículas grandes (maiores que 15 μm) que quando inaladas não ultrapassam as vias respiratórias superiores, sendo removidas no nariz e na garganta. Porém foi observado que maioria das partículas eram de aproximadamente 10 μm . Esta faixa de partículas é de grande preocupação, porque quando inaladas podem alcançar o sistema respiratório inferior, chegando aos alvéolos pulmonares.

3.2. Caracterizações dos tecidos filtrantes

Com o objetivo de investigar a influência da estrutura do meio filtrante na operação de filtração por pulso de ar e a sua regeneração, foram selecionados dois tipos de tecidos muito utilizados comercialmente, sendo eles: Feltro de Polipropileno e Feltro de Acrílico, ambos cedidos pela empresa Gino Cacciari. As especificações técnicas fornecidas pelo fabricante destes tecidos estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Especificações técnicas dos tecidos filtrantes.

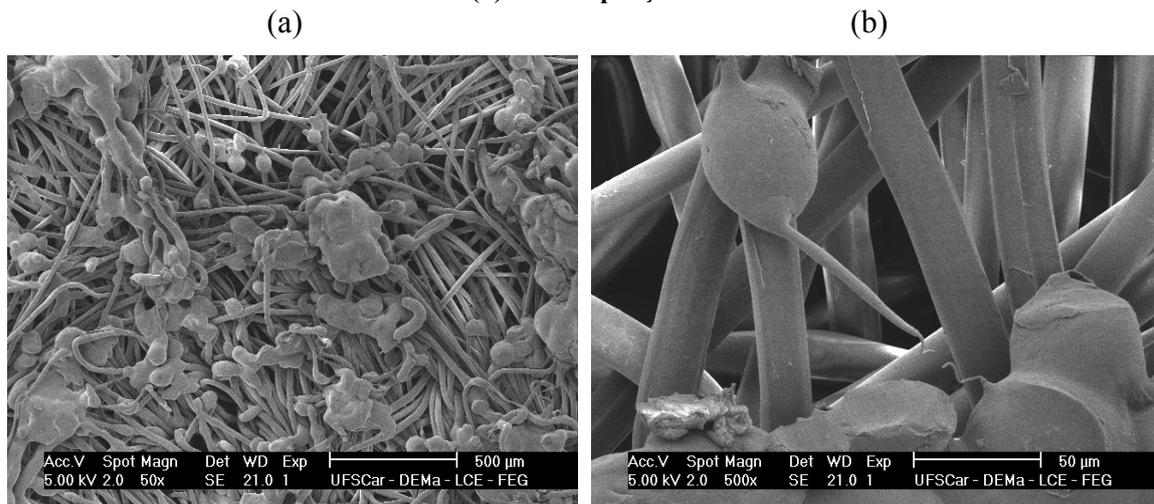
CARACTERÍSTICAS	POLIPROPILENO	ACRÍLICO
Contextura	Feltro agulhado	Feltro agulhado
Acabamento	Calandrado e chamuscado	Calandrado e chamuscado
Fibra	100%	100%
Peso	600 g/m ²	600 g/m ²
Espessura	2,5 a 2,8 mm	2,5 a 2,8 mm
Permeabilidade ao ar	120 L/dm ² /min	120 L/dm ² /min

Fonte: GINO CACCIARI.

Visando obter melhor avaliação dos resultados foi realizada a caracterização destes meios filtrantes através da análise das superfícies por meio de micrografias de amostra dos tecidos, verificadas através das Figuras 3.4 e 3.5, geradas no MEV com

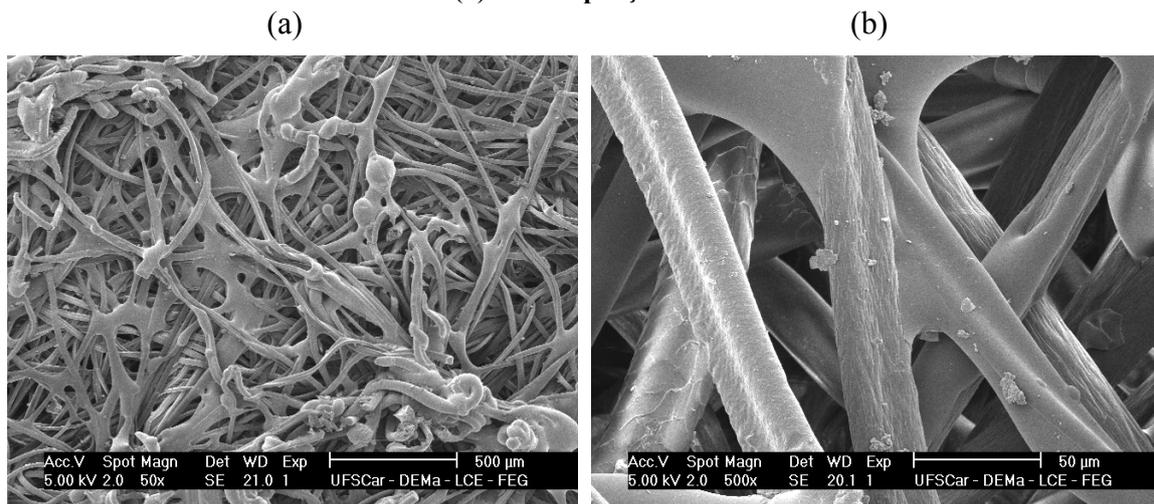
ampliação de 50 e 500 vezes. Utilizando estas imagens e o Programa Image Pro Plus 7.0, notou-se que o diâmetro das fibras do polipropileno foi de 12 a 23 μm e a distância entre as fibras do polipropileno variaram de 10 a 60 μm . Já o diâmetro das fibras do acrílico foi de 19 a 31 μm , aproximadamente, e a distância entre as fibras do acrílico foi de 10 a 53 μm .

Figura 3. 4- Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV (a) com ampliação de 50x e (b) com ampliação de 500x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 3. 5 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV (a) com ampliação de 50x e (b) com ampliação de 500x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

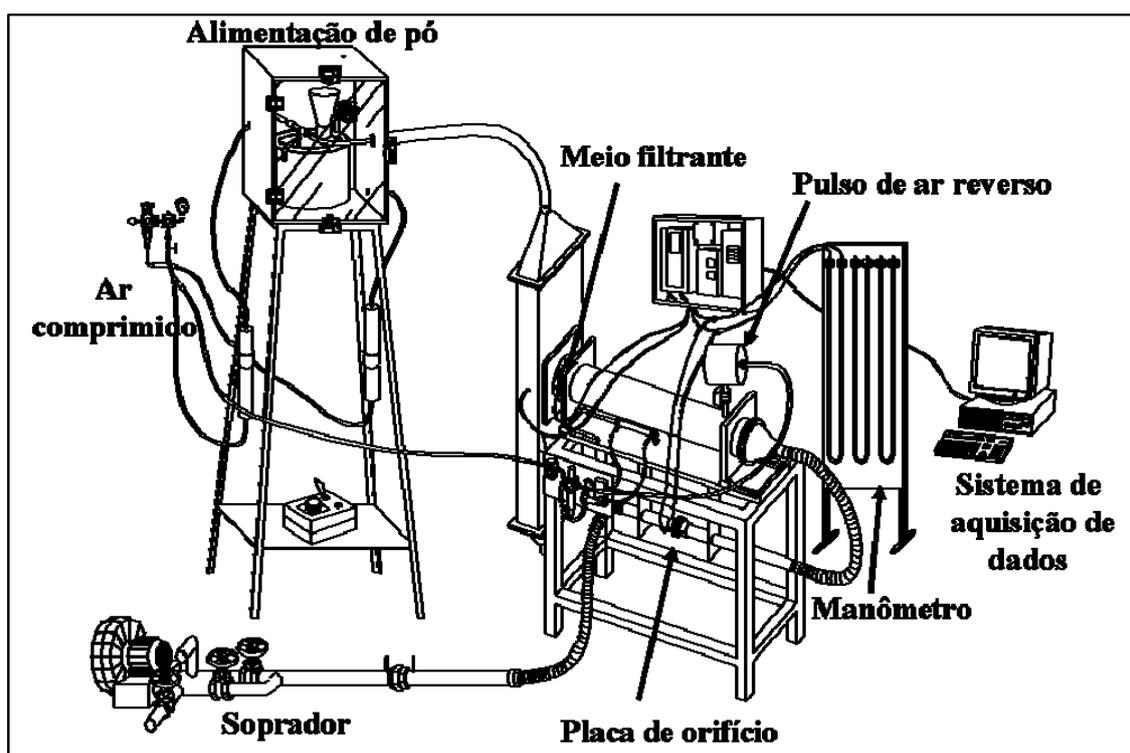
Para realização dos ensaios de filtração cortou-se o meio filtrante em secções circulares de 17 cm de diâmetro, resultando numa área filtrante de 227 cm^2 .

3.3. Unidade experimental

Para o desenvolvimento do trabalho foi utilizada a unidade experimental de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, localizada no Laboratório de Controle Ambiental, do DEQ/UFSCar.

O sistema, ilustrado na Figura 3.6, foi composto por um alimentador de partículas tipo prato giratório, uma tubulação de interligação entre o alimentador de partículas e o meio filtrante, um suporte para o meio filtrante, um sistema de limpeza por pulso, um pistão automático de abertura e fechamento do suporte do meio filtrante, uma tubulação de saída de gás, uma placa de orifício, uma saída de pó e um sistema de aquisição de dados.

Figura 3. 6 - Ilustração do equipamento de filtração/limpeza por pulso a jato de ar.



Localizado: Laboratório de Controle Ambiental DEQ/UFSCAR, 2013.

O alimentador de partículas era composto por um prato giratório, um sistema de sucção de pó, um nivelador de pó, um reservatório de pó e um sulco semicircular.

O nivelador de pó garantia a mesma quantidade de material particulado em qualquer ponto do sulco no prato giratório. A rotação do prato giratório era realizada por ação de um motor. Um Venturi permitia a sucção do material particulado do prato que era alimentado na corrente gasosa.

Para garantir a baixa umidade do ar no interior da caixa de alimentação o ar comprimido, inicialmente passou por duas colunas contendo sílica gel, entrando na caixa de alimentação praticamente ar seco (aproximadamente 20% de umidade). Os valores de umidade foram obtidos por um medidor de temperatura e umidade, durante todo o procedimento experimental.

Assim que a umidade de 20 % era alcançada o meio filtrante preso pelo suporte, conectado à tubulação de filtração e fixado pelo pistão automático de abertura e fechamento do suporte. O soprador era então ligado e a velocidade de filtração era ajustada. Ao se iniciar a filtração o valor de queda de pressão em função do tempo de filtração era registrado no sistema de aquisição de dados.

Todo experimento foi controlado por um *software* (desenvolvido pela Empresa T&S Equipamentos), que registrava as variáveis de interesse do processo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, através de uma placa de aquisição de dados interligada ao notebook, que permitia a leitura dos sinais dos sensores externos (sensores diferenciais de pressão).

Um dos sensores posicionado entre a placa de orifício registrava a queda de pressão na placa e assim obtinha-se a velocidade de filtração. Esse dado era registrado no programa computacional, e também podia ser medido pelo manômetro diferencial tipo tubo em U, que utilizava água como fluido manométrico, instalado na linha entre a descarga da caixa de filtração e o soprador.

O soprador foi controlado pelo inversor de frequência, para que a vazão de ar fosse sempre constante. Os dados obtidos pelo sensor diferencial de pressão do filtro foram armazenados e plotados em gráfico em função do tempo de filtração.

3.4. Metodologia experimental

3.4.1. Alimentação de pó

Para a calibração da alimentação de pó, em cada ensaio realizado, os meios filtrantes eram pesados em balança analítica no início (M_{FILTRO}) e no final ($M_{FILTRO+TORTA}$) da filtração e assim era determinada a massa de material particulado capturado na filtração ($M_{DEPOSITADA}$):

$$M_{DEPOSITADA} = M_{FILTRO+TORTA} - M_{FILTRO} \quad (3.1)$$

Dividindo a Equação (3.1) pelo tempo total da filtração (T), tem-se a vazão de pó depositada no meio filtrante (v):

$$v = \frac{M_{DEPOSITADA}}{T} \quad (3.2)$$

O experimento foi realizado em seis réplicas para garantir boa reprodutibilidade dos dados. E, assim, determinou-se a vazão de pó alimentada, e esta foi de aproximadamente 0,015 g/s, utilizando a rotação do prato 20 %. Desta forma, em todos os experimentos era mantida esta vazão constante de pó.

3.4.2. Fluxo de ar

A placa de orifício de 8 mm foi calibrada através da medição da saída de ar após a passagem pelo filtro por um manômetro digital, que determinou a velocidade na placa de orifício correspondente à velocidade e à vazão de filtração. Comparou-se então a

vazão de filtração a pressão no filtro, que por sua vez foi medida pela coluna d'água e registrada pelo programa computacional. Assim, foi possível dar início aos experimentos, fixando-se as velocidades de filtração.

Na calibração da placa de orifício pode-se construir o gráfico linear de queda de pressão (ΔP) pela vazão de filtração (cm^3/s), como apresentado na Figura 3.7. Foi considerado o diâmetro da placa de orifício ($D_{\text{orifício}}$) de 8 mm, o diâmetro interno da tubulação de 42 mm, a área de $0,001385 \text{ m}^2$ e a constante de vazão volumétrica (K) de $3,91 \times 10^{-5}$. E, através da Equação (3.3) pode-se estimar a vazão volumétrica:

$$Q_{\text{volumétrica}} = c \frac{1}{\sqrt{\beta^4}} \pi \frac{D_{\text{orifício}}^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (3.3)$$

Em que neste caso:

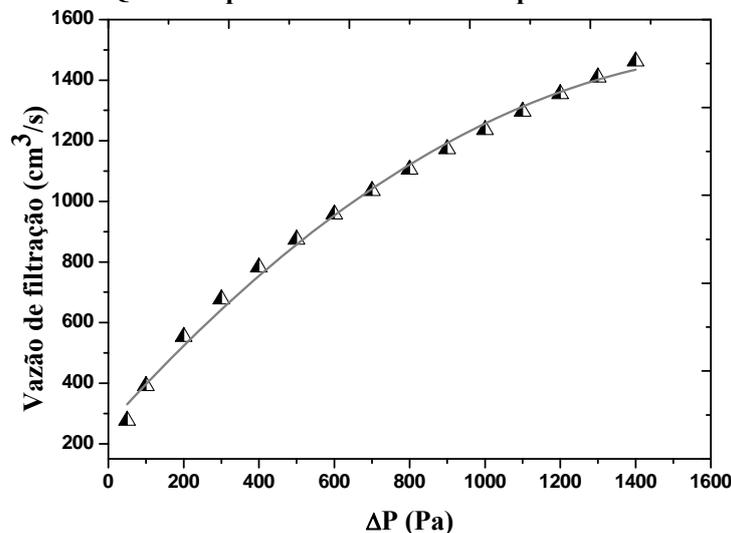
β : diâmetro da placa de orifício pelo diâmetro interno da tubulação, portanto, β é igual a 0,19047;

c : coeficiente de descarga (vazão real pela vazão teórica);

ρ : é igual a 1,18.

ΔP : queda de pressão.

Figura 3. 7 – Queda de pressão no meio filtrante pela vazão de filtração.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A Tabela 3.2 apresenta as vazões correspondentes às velocidades de filtração utilizadas.

Tabela 3.2 – Velocidades de filtração e vazões de gás utilizadas.

Vazão de gás (cm³/s)	Velocidade de filtração (cm/s)
390,84	2
873,95	4
1235,95	6

Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

3.4.3. Planejamento experimental

Para estimativa da eficiência do equipamento de pulso de ar reverso diante as variações de número de ciclos de filtração e limpeza e dos meios filtrantes, foram feitos testes específicos para se obter as informações desejadas de tempo de pulso, queda de pressão máxima e de velocidade de filtração.

Nos testes preliminares para se obter o desempenho do equipamento por pulso de ar reverso utilizou-se a rocha fosfática como material particulado (colocada em estufa por vinte e quatro horas para reduzir a umidade presente no material), e os meios filtrantes polipropileno e acrílico de área 227 cm². Esses eram pesados inicialmente em balança analítica. Após cada ensaio de filtração e limpeza, o filtro era novamente pesado na mesma balança, e obtinha-se a massa de pó depositada no meio filtrante.

Foram realizados ensaios de filtração e limpeza, com velocidade de 4 cm/s, tempo de pulso de 200 ms, diferença de pressão máxima de 200 Pa e o número de ciclos de filtração e limpeza de 1, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 e 200 ciclos. Para cada meio filtrante foram feitos até 200 ciclos de filtração, e para todos os ensaios de filtração e limpeza obteve-se microfotografias em MEV. Na sequência, tem-se a descrição desses ensaios experimentais. Nesta etapa, a velocidade de filtração era mantida automaticamente constante pelo *software*.

As etapas do processo de filtração e limpeza estão resumidas em: limpeza do equipamento, preparo do material, preparo do tecido e ajuste da velocidade de filtração.

Após cada ensaio de filtração, ao atingir a queda de pressão máxima pré determinada, a operação de limpeza do meio filtrante teve sua consequente realização.

O ar contendo as partículas era succionado através do compartimento contendo o filtro de tecido. Com a retenção do pó na superfície do filtro formava-se a torta de filtração. O ar limpo atravessava o filtro e tinha sua vazão medida pela placa de orifício, sendo que a velocidade superficial de filtração era mantida constante durante todo o processo. Em sequência o ar passava pelo soprador e era descarregado na atmosfera até que se atingisse a queda de pressão máxima. Na sequência era dado o pulso de ar de 200 ms, e ocorria o desprendimento da camada de pó. Nesta etapa de limpeza, um pulso de ar era dado em direção contrária a fluxo normal de ar-partícula, como uma tentativa de o filtro retornar as propriedades mais próximas possíveis das iniciais, antes do início da filtração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Seguem neste capítulo os resultados de avaliação do comportamento dos meios filtrantes (feltro de polipropileno e o feltro de acrílico) utilizando a operação de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

4.1. Ensaio de filtração e limpeza no feltro de polipropileno

Com a finalidade de analisar o desempenho do equipamento por pulso de ar reverso durante as operações de filtração e de limpeza do meio filtrante, construiu-se gráficos dos ciclos de filtração e limpeza, com as curvas de queda de pressão (Pa) em função do tempo de filtração (s). Neste trabalho estes foram os primeiros resultados obtidos utilizando o feltro de polipropileno como meio filtrante, em um ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. O principal parâmetro verificado neste ensaio foi o tempo de pulso. Na Tabela 4.1 são mostrados os valores utilizados durante os ensaios de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

Tabela 4.1 - Parâmetros utilizados nos ensaios de filtração e limpeza do meio filtrante.

Ensaio de filtração e limpeza	01	02	03	04	05	06	07	08	09
Tempo de pulso (ms)	200	300	400	500	600	700	800	900	1000

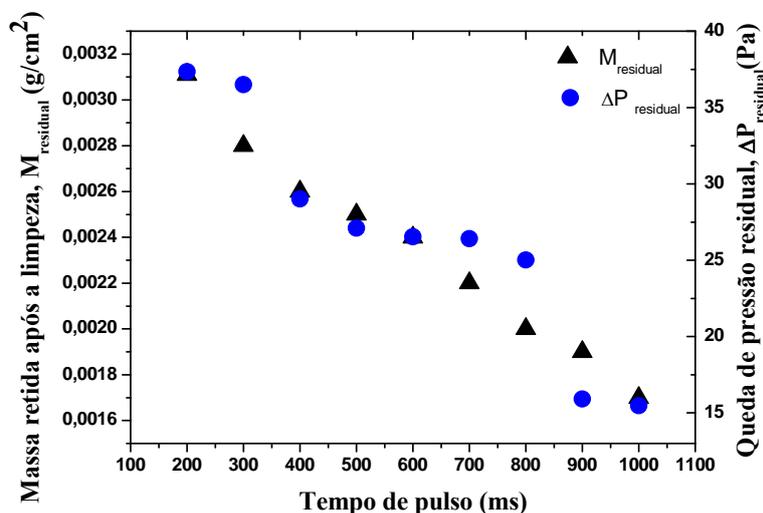
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

De posse destes dados e avaliando-se a necessidade em trabalhar com os melhores parâmetros operacionais. Optou-se, primeiramente, em executar os ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso no tecido de polipropileno, mantendo constante a pressão do pulso de limpeza de 4 bar, a queda de pressão máxima de 200 Pa e a velocidade de filtração de 4 cm/s, alterando apenas o tempo de pulso durante a operação de limpeza do meio filtrante. O tempo de pulso foi variado para verificar o

comportamento do meio filtrante submetido a diferentes tempos de pulso de limpeza e a eficiência de remoção do material particulado, concentrado fosfático, para cada tempo de pulso utilizado.

Na Figura 4.1 é apresentada a massa retida por unidade de área do filtro após a limpeza do material particulado, concentrado fosfático, em cada um dos ensaios, assim como a queda de pressão residual. Em cada ensaio de filtração e limpeza empregou-se um tempo de pulso de limpeza entre 200 e 1000 ms, referente ao apresentado na Tabela 4.1.

Figura 4.1 – Massa retida e queda de pressão residual em função do tempo de pulso, para o tecido de polipropileno.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

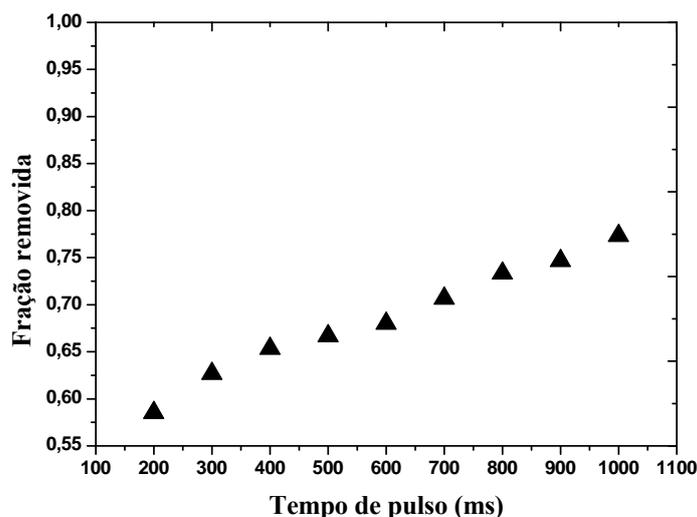
Pela obtenção da massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso, foi possível analisar o diâmetro médio das partículas retidas sobre as fibras superficiais do feltro de polipropileno. E estas partículas apresentaram um diâmetro médio volumétrico correspondente a 3,0 μm , obtido pela média de três análises no equipamento Malvern Mastersizer Microplus .

Analisando a Figura 4.1 pode-se observar a diminuição da massa retida após a limpeza e da queda de pressão residual com o aumento do tempo de pulso na operação de limpeza do meio filtrante por pulso de ar reverso. Notou-se assim que os maiores tempos de pulso facilitaram a remoção das partículas aderidas ao filtro durante a

filtração, utilizando a queda de pressão de 200 Pa, a velocidade de filtração de 4 cm/s, o meio filtrante de polipropileno e o material particulado de concentrado fosfático.

Para melhor observação do desempenho da limpeza por pulso de ar reverso, a eficiência de remoção do pó é um parâmetro importante a ser considerado. Considerando isto, graficou-se a fração de massa removida em função do tempo de pulso de limpeza, como apresentado a Figura 4.2.

Figura 4.2 - Fração removida em função do tempo de pulso, no feltro de polipropileno.



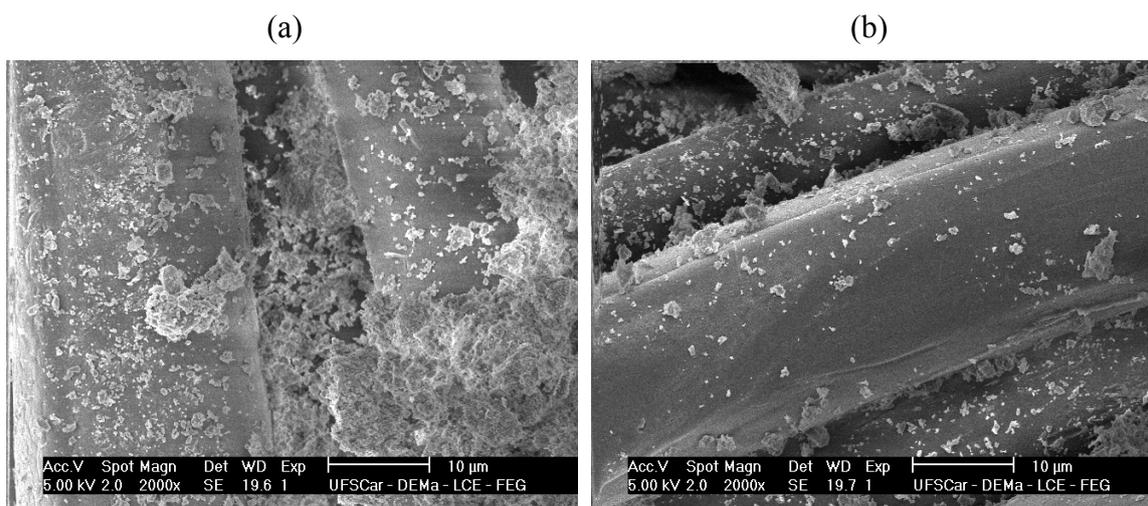
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Conforme pode ser visto na Figura 4.2, o tempo de pulso de 200 ms apresentou uma eficiência de remoção de pó de aproximadamente 58%. Utilizando um tempo de pulso de 1.000 ms este valor apresentou um aumento significativo, com uma eficiência de limpeza em torno de 77%. Neste caso pode-se dizer que ao utilizar um maior tempo de pulso, maior foi a força aplicada para superação da interação intermolecular (partícula-filtro), por isso obteve-se uma melhor a remoção das partículas. Este fenômeno pode ser também observado por fotografias obtidas no MEV, como mostrado na Figura 4.3.

Na Figura 4.3 são apresentadas as imagens superficiais do feltro de polipropileno, geradas no MEV, submetido a um ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, à queda de pressão de 200 Pa, à velocidade de 4 cm/s, à pressão de pulso de 4 bar, utilizando tempo de pulso de 200 ms e de 1.000 ms.

Nota-se, na Figura 4.3, que para um tempo de pulso de 200 ms, observou-se maior quantidade de partículas retidas na superfície do meio filtrante em relação à exposição a um tempo 100 ms. Consta-se, portanto, que um maior tempo de pulso pode contribuir para superar a ação das forças de adesão entre as partículas e remover uma maior quantidade de material particulado, como mostrado nas Figuras 4.1 e 4.2. De acordo com SIMON *et al.* (2007), as maiores eficiências de limpeza podem ser associadas a menores forças de adesão entre as partículas, ou seja, relacionam-se a ação de interações intermoleculares ou interações não covalentes. Por isso, estas operações podem ser relacionadas como interações relativamente fracas entre partícula-elemento filtrante, muitas vezes reversível e altamente seletiva entre estas duas moléculas (intermolecular).

Figura 4.3 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a tempo de pulso de 200 ms com ampliação de 2000x, (b) a tempo de pulso de 1.000 ms com ampliação de 2000x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

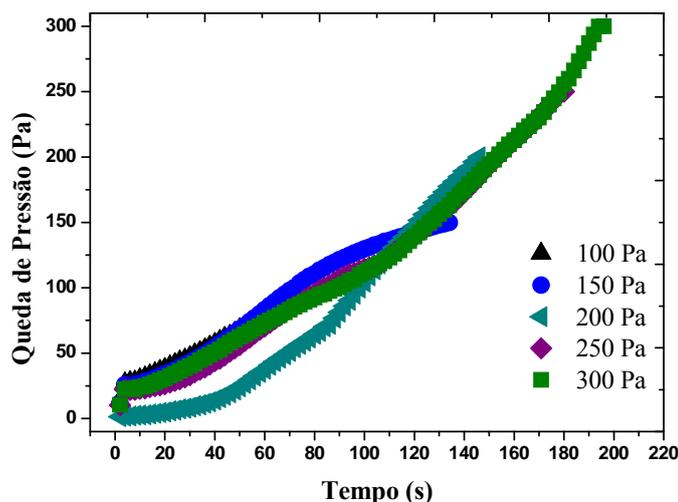
HATA *et al.* (2004) avaliaram a interferência do acréscimo do tempo de pulso na quantidade de massa retida após a limpeza, utilizando tempos de pulso entre 10 a 180 ms durante a limpeza do filtro de cerâmica. Eles obtiveram resultados semelhantes aos encontrados neste trabalho, apresentando menor quantidade de pó retido após a limpeza utilizando maior tempo de pulso submetido, à velocidade de filtração de 5 cm/s e à queda de pressão 3.600 Pa.

Ji *et al.* (2004), mostraram por simulações, e confirmaram com experimentos, o aumento da influência da pressão dentro da unidade experimental pelo acréscimo na duração do pulso, através da análise do fluxo transiente de pulso de ar reverso, para o filtro de cerâmica. Os autores concluíram que um sistema adequado de limpeza por pulso não se reduz só ao consumo de energia gasto pelo pulso, mas também pela eficiência da limpeza.

Considerando a importância dos parâmetros operacionais mantidos constantes utilizados nestes ensaios de filtração e limpeza, realizaram-se alterações nestes parâmetros para verificar se os valores utilizados até o momento foram os melhores relacionados ao desempenho do equipamento de pulso de ar reverso. Assim, a queda de pressão e a velocidade de filtração foram também variadas e mantiveram-se constante durante os ensaios somente o tempo de pulso referente a 200 ms. O tempo de pulso escolhido foi o de menor valor analisado devido ter sido o valor mais encontrado na literatura, além disto, este apresentou a maior queda de pressão residual e a maior massa residual, e, um menor desgaste do meio filtrante.

Na Figura 4.4 são apresentados os resultados para a queda de pressão durante os ensaios de filtração e limpeza utilizando a velocidade de filtração de 4 cm/s e o tempo de pulso de 200 ms, para diferentes quedas de pressão.

Figura 4.4 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, a queda de pressão de 100, 150, 200, 250 e 300 Pa no tecido de polipropileno.



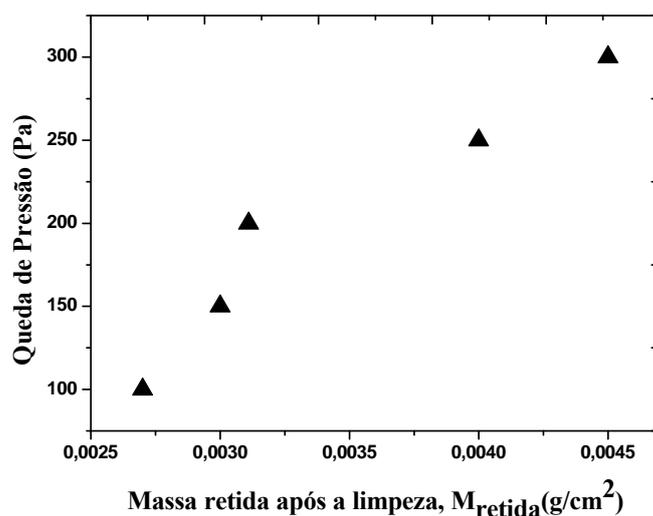
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Notou-se na Figura 4.4, que o acréscimo da queda de pressão foi acompanhado pelo tempo de filtração, ou seja, entre o intervalo de 100 a 300 Pa, o tempo de filtração variou de 74 a 196 s. Este mostrou-se um comportamento típico da filtração, ou seja, a medida que aumentou a queda de pressão máxima, o tempo de filtração também aumentou. Nesta figura também foi possível observar que curvas de filtração apresentaram-se diferentes até 100 Pa, ou seja, no início de todos os ensaios. Isto pode ter ocorrido devido à compactação do tecido durante sua fabricação, o que pode ter diferenciado cada área de corte do meio filtrante. Portanto, tem-se a necessidade de reproduzir estas curvas.

Durante os ensaios alterando a queda de pressão, constatou-se o aumento da massa retida após a limpeza com o acréscimo da queda de pressão máxima, como apresentado na Figura 4.5. E, este aumento da massa retida pela queda de pressão pode ser atribuído pelo preenchimento do meio filtrante, como mostrado na Figura 4.6.

Na Figura 4.6 são apresentadas as imagens superficiais do feltro de polipropileno, geradas no MEV com ampliação de 2.000x, submetido à queda de pressão máxima de 100 Pa e 300 Pa, à velocidade de 4 cm/s e a um tempo de pulso de 200 ms.

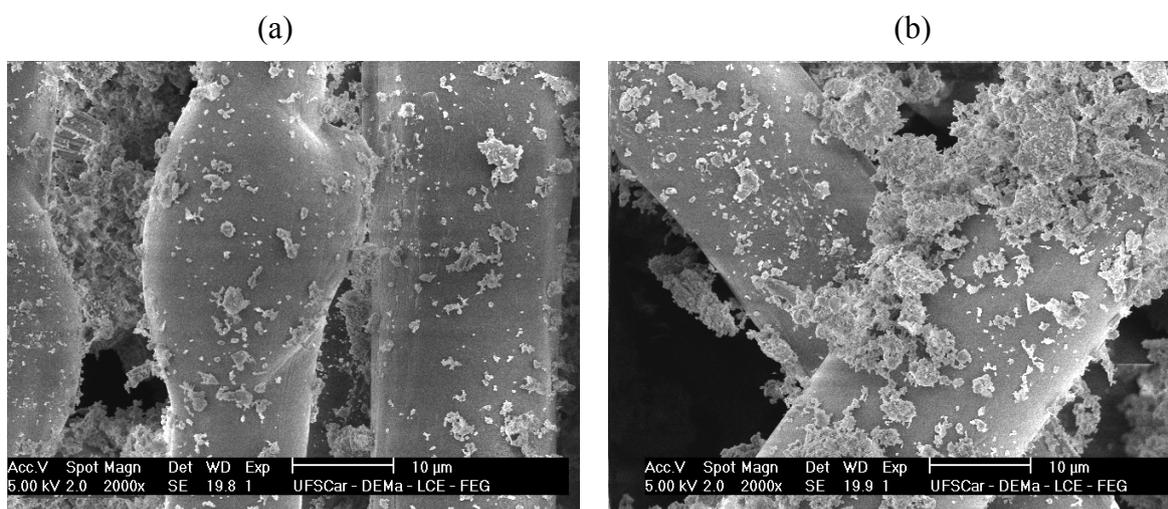
Figura 4.5 – Massa retida por unidade de área após a limpeza em função da queda de pressão máxima.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Através da análise da Figura 4.6, fica nítido o acréscimo de material particulado após a limpeza com aumento da queda de pressão. Na Figura 4.6 (a) é mostrado o comportamento de filtração de profundidade e uma menor quantidade de partículas aderidas às fibras em relação ao apresentado na Figura 4.6 (b), onde pode-se ver com clareza a formação dos dendritos nas fibras do feltro de polipropileno, característico da filtração superficial.

Figura 4.6 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a queda de pressão de 100 Pa com ampliação de 2000x e (b) a queda de pressão de 300 Pa com ampliação de 2000x.

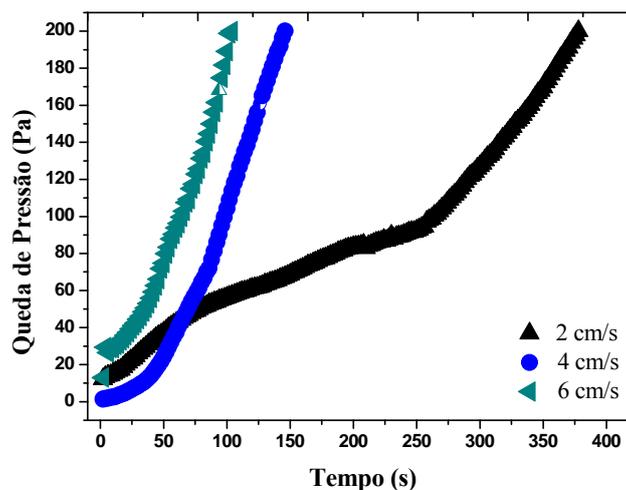


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.7 são mostrados os ensaios de filtração e limpeza utilizando a queda de pressão de 200 Pa, o tempo de pulso de 200 ms, a pressão de pulso de 4 bar, para diferentes valores de velocidade de filtração em torno de 2 a 6 cm/s.

Conforme pode ser visto na Figura 4.7, o aumento da velocidade de filtração, numa faixa compreendida entre 2 a 6 cm/s, interferiu diretamente no aumento da queda de pressão durante a filtração e na diminuição do tempo de filtração. O ensaio 2 utilizando a velocidade de filtração de 4 cm/s e o ensaio 3 utilizando a velocidade de filtração de 6 cm/s foram mais próximos, em relação ao ensaio 1 utilizando a velocidade de filtração de 2 cm/s. Assim, permitiu-se observar que a velocidade de filtração de 4 cm/s é um ótimo valor operacional a ser adotado neste equipamento de pulso de ar reverso, por não ocasionar uma operação rápida demais. Segundo IINOYA e DENNIS (1987), altas velocidades de filtração necessitam de um aumento da potência requerida pelo soprador aumentando assim o custo da operação.

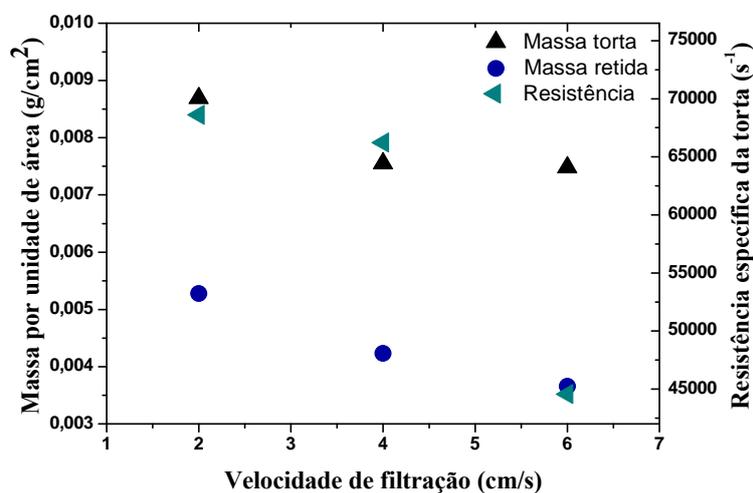
Figura 4.7 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, a velocidade de 2, 4 e 6 cm/s no tecido de polipropileno.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Devido às grandes diferenças apresentadas pelo perfil de filtração e limpeza (Figura 4.7) verificou-se a resistência específica da torta de filtração, a massa da torta e a massa retida após a limpeza, como apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 –A massa retida, a massa da torta e a resistência específica da torta em função da velocidade de filtração.

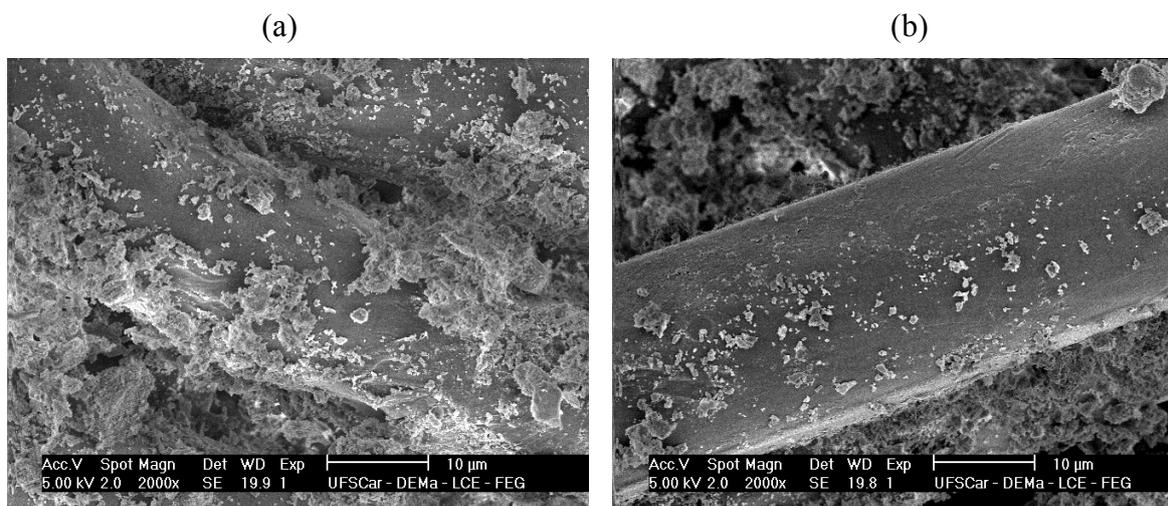


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Analisando a Figura 4.8 pode-se verificar que o acréscimo da velocidade de filtração, proporcionou o decréscimo da massa da torta de filtração e da massa retida após a limpeza, assim como o decréscimo da resistência específica da torta. Por isso,

pode-se dizer que com a maior velocidade de filtração as partículas penetram mais no interior do meio filtrante do que fica retida na superfície do filtro e possivelmente, menor se apresenta à massa da torta de filtração e a resistência específica da torta. Conseqüentemente, mais fácil a remoção destas partículas por pulso de ar reverso. Condizente a isto, na Figura 4.9, observam-se as imagens da superfície do meio filtrante polipropileno geradas no MEV, à ampliação de 2.000x e à velocidades de 2 e 6 cm/s.

Figura 4.9 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após 1 ciclo de filtração e limpeza (a) à velocidade 2 cm/s com ampliação de 2000x e (b) à velocidade 6 cm/s com ampliação de 2000x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Por meio da observação da Figura 4.9, permitiu-se comprovar que uma maior quantidade de massa permanece retida após a limpeza por pulso de ar reverso utilizando a velocidade de 2 cm/s em relação à velocidade de 6 cm/s, além da maior formação de dendritos nas fibras do meio filtrante.

A partir dos ótimos resultados apresentados e do satisfatório desempenho do equipamento de pulso de ar reverso, limitou-se à queda de pressão em 200 Pa, ao tempo de pulso em 200 ms e à velocidade de filtração em 4 cm/s. Fixando estes valores pode-se permitir uma melhor avaliação do comportamento do feltro de polipropileno com o acréscimo apenas do número de ciclos de filtração e limpeza, como será apresentado a seguir.

4.2. Influência do número de ciclos de filtração e limpeza no tecido de polipropileno

Com o intuito de observar o comportamento do feltro de polipropileno submetido ao acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza, desempenharam-se ensaios de filtração e limpeza utilizando o equipamento de pulso de ar reverso, empregando o concentrado fosfático como material particulado, mantendo constante a vazão de pó de 0,015 g/s, a velocidade de filtração de 4 cm/s, a pressão do pulso de limpeza de 4 bar, a queda de pressão máxima de 200 Pa e o tempo de pulso de 200 ms.

4.2.1. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 1º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

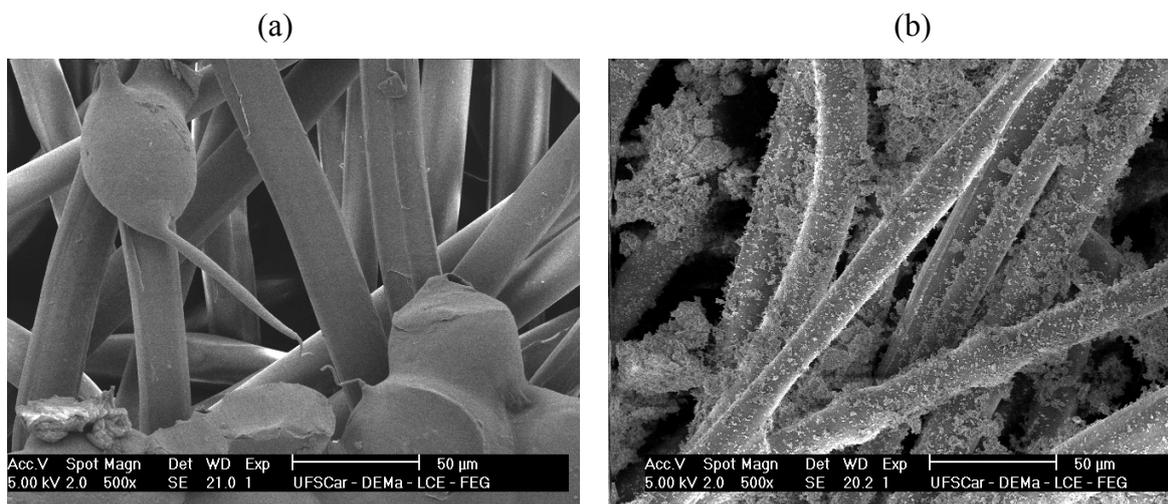
Este ensaio baseia-se em um ciclo de filtração e limpeza no tecido de polipropileno e mostra o desempenho do equipamento de pulso de ar reverso durante a filtração, na detecção do acréscimo da quantidade de material particulado nas fibras do meio filtrante. Este comportamento do feltro de polipropileno pode ser observado na Figura 4.10.

Na Figura 4.10 é apresentada a imagem da superfície do feltro de polipropileno antes da filtração, ainda virgem, e após um ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Nesta figura é possível verificar diferença entre os meio filtrantes. Na Figura 4.10 (b) é apresentada a superfície do filtro submetido a uma filtração e limpeza, e observa-se uma quantidade de partículas aderidas no interior das fibras e na superfície formando os dendritos.

Após esta observação do comportamento do feltro de polipropileno submetido a um ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, constatou-se que o acréscimo no número de ciclos de filtração e limpeza utilizando os mesmos parâmetros operacionais pesaria para o fechamento deste trabalho. Logo se sabe que a limpeza do tecido não foi totalmente eficiente, devido a uma quantidade significativa de partículas retidas no meio filtrante, mesmo depois de passar por uma operação de limpeza do filtro. Portanto,

considerando isto, foi feito o estudo do feltro de polipropileno após vários ensaios de filtração e limpeza.

Figura 4.10 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) antes da filtração, com ampliação de 500x, e (b) após 1 ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com ampliação de 500x.



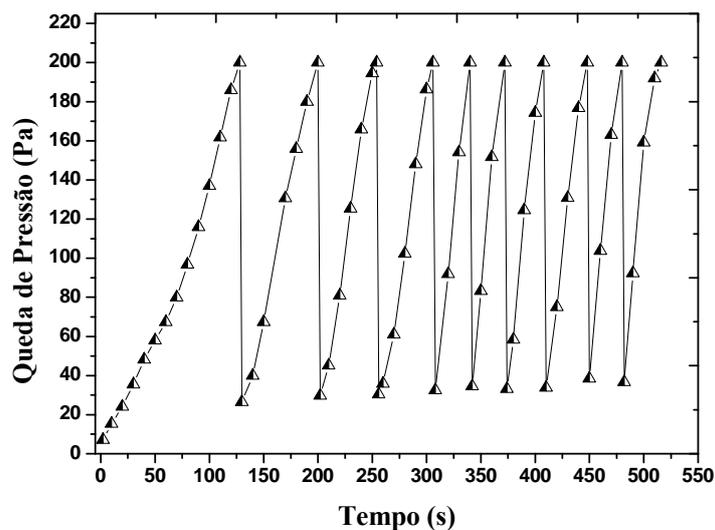
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

4.2.2. *Queda de pressão em função do tempo de filtração - 10º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso*

Na Figura 4.11 são apresentados os resultados para a queda de pressão durante os 10 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Todas as curvas mostram o aumento da queda de pressão com o aumento do tempo de filtração, utilizando a velocidade de filtração de 4 cm/s, a queda de pressão máxima de 200 Pa, o tempo de pulso de 200 ms e a pressão do pulso de 4 bar.

Observando a Figura 4.11, o primeiro ciclo apresenta tempo de filtração maior que os demais ciclos de filtração e limpeza, com a concavidade para cima e não linear no início da mesma. Já no segundo ciclo de filtração este comportamento é pouco verificado. Após o 5º ciclo há uma tendência de estabilidade das curvas de filtração e limpeza, certamente devido à saturação do meio filtrante de polipropileno pelo material particulado.

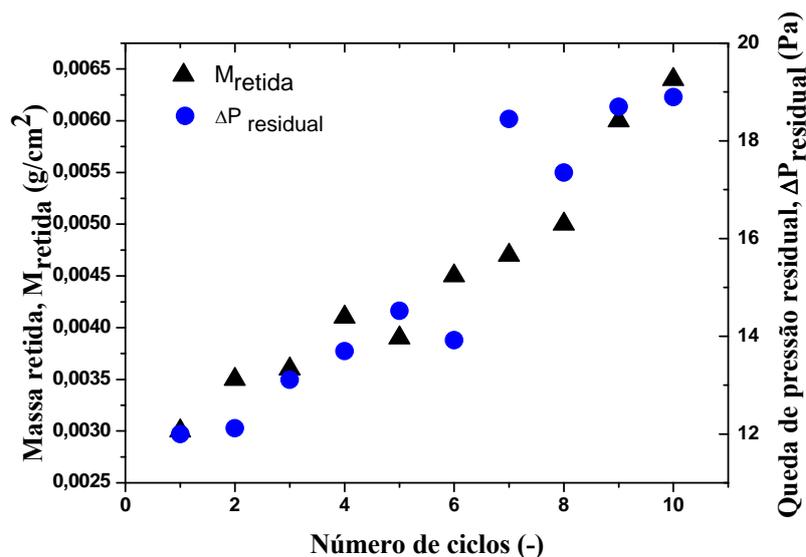
Figura 4.11 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 10 ciclos de filtração e limpeza.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Durante a filtração e limpeza verifica-se uma tendência de aumento da queda de pressão residual, relacionada à quantidade de material particulado que permanece no filtro de polipropileno após a limpeza por pulso de ar reverso. Na Figura 4.12 é apresentado o número de ciclos de filtração e limpeza em função da queda de pressão residual e da massa retida.

Figura 4.12 - Número de ciclos em função da massa retida e da queda de pressão residual.

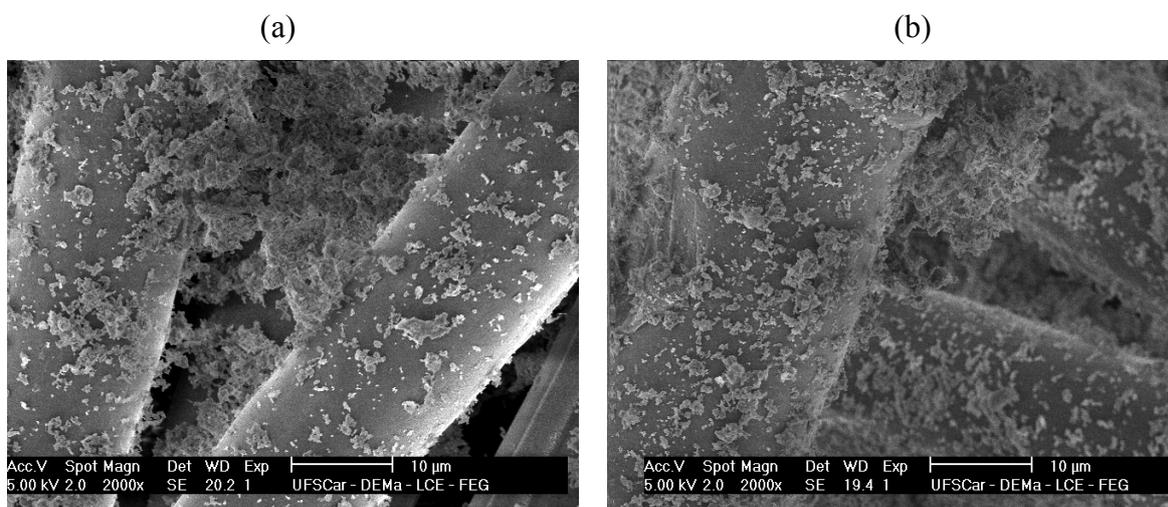


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Por meio da Figura 4.12, verificou-se uma tendência de aumento da queda de pressão residual e da massa retida após a limpeza com o acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza. A queda de pressão residual não excedeu 20 Pa e a massa retida não excedeu $0,0065 \text{ g/cm}^2$. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura que utilizaram o equipamento de pulso de ar reverso, apresentaram o mesmo comportamento observado, de aumento da massa retida e da queda de pressão em função do número de ciclos. Isto apontou que a ação da limpeza pode ser dificultada após o tecido ser submetido a muitos ciclos de filtração (HINDY *et al*, 1987; LO *et al*, 2010; SALEEM *et al*, 2011; GINESTET e PUGNET, 2012).

Na Figura 4.13 são comparados o 1º e o 10º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso por meio de imagens geradas no MEV da superfície do feltro de polipropileno.

Figura 4.13 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) em um ciclo de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) em 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.



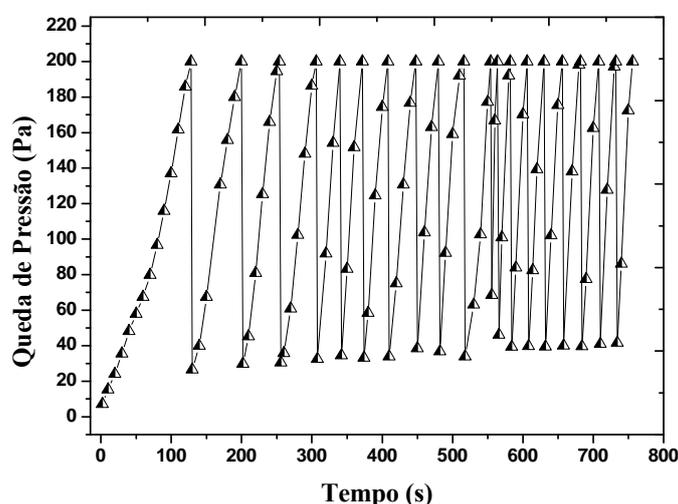
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.13 (b), as fibras mostraram-se mais recobertas pelas partículas de fosfato concentrado e estas garantiram poucos espaços vazios entre as fibras. Notou-se assim que os tecidos novos podem ter maior capacidade de retenção de partículas durante a filtração, o que diminui acentuadamente após a limpeza por pulso de ar reverso, devido ao desgaste das fibras e seu recobrimento pelo material particulado. O mesmo comportamento foi verificado por GINESTET e PUGNET, 2012.

4.2.3. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

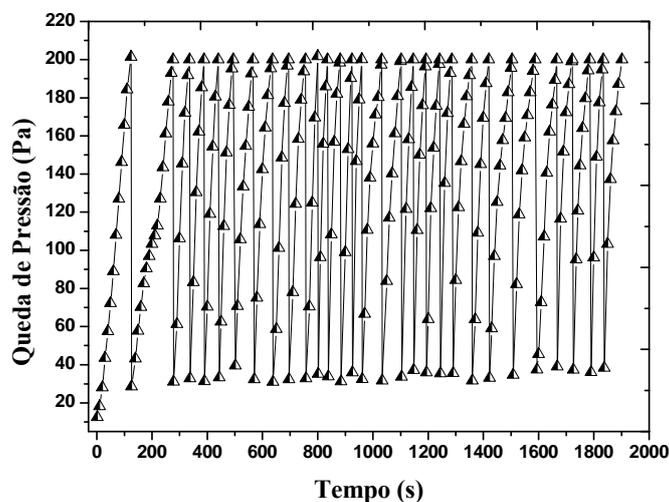
Os resultados obtidos para o feltro de polipropileno durante 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza realizados com rocha fosfática estão apresentados nas Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17. Verifica-se que o comportamento das dez primeiras curvas de filtração do polipropileno foram qualitativamente semelhante aos 10 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso mostradas anteriormente, utilizando os mesmos parâmetros operacionais, de tempo de pulso de 200 ms, de velocidade de filtração de 4 cm/s e a queda de pressão de 200 Pa.

Figura 4.14 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 20 ciclos de filtração e limpeza.



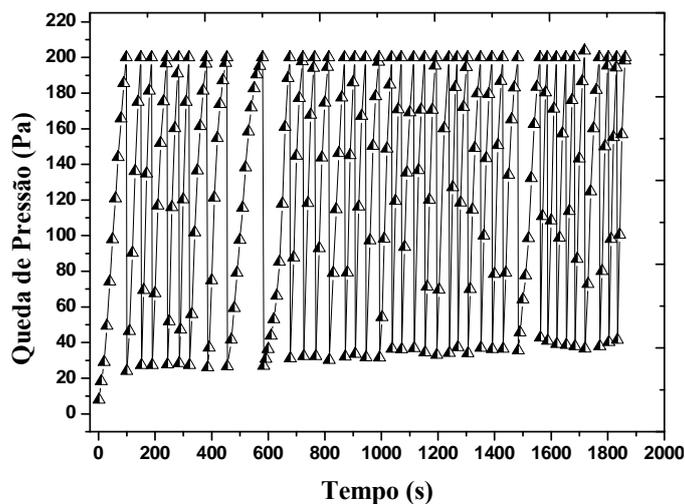
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.15 – Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 30 ciclos de filtração e limpeza.



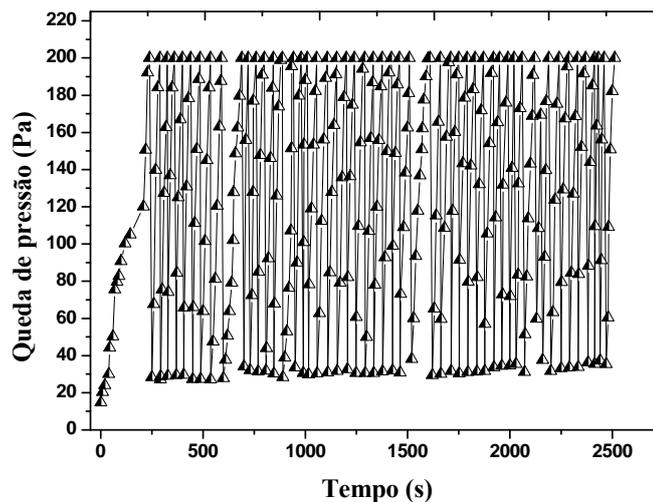
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.16 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 40 ciclos de filtração e limpeza.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.17 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 50 ciclos de filtração e limpeza.

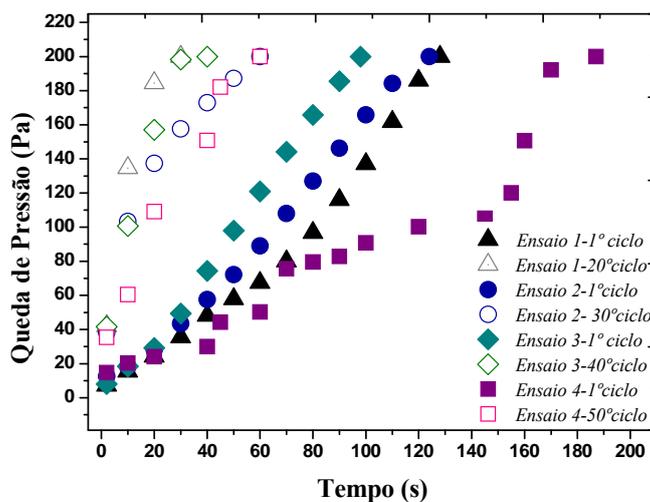


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Por meio da análise das Figuras 4.14, 4.15, 4.16 e 4.17, ficou evidente que o 1º ciclo de filtração e limpeza apresentou um maior tempo de duração em relação ao último ciclo. KANAOKA e AMORNKITBAMRUNG (2001) concluíram que a menor duração do ciclo pode estar atribuída à menor porosidade do meio filtrante.

A fim de melhorar a visualização da diminuição do tempo de filtração nos últimos ciclos de filtração e limpeza, comparou-se o 1º ciclo ao 20º, 30º, 40º e 50º ciclo, como apresentado na Figura 4.18.

Figura 4.18 - Comparação entre o 1º ciclo e o 20º, o 30º, 40º e o 50º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

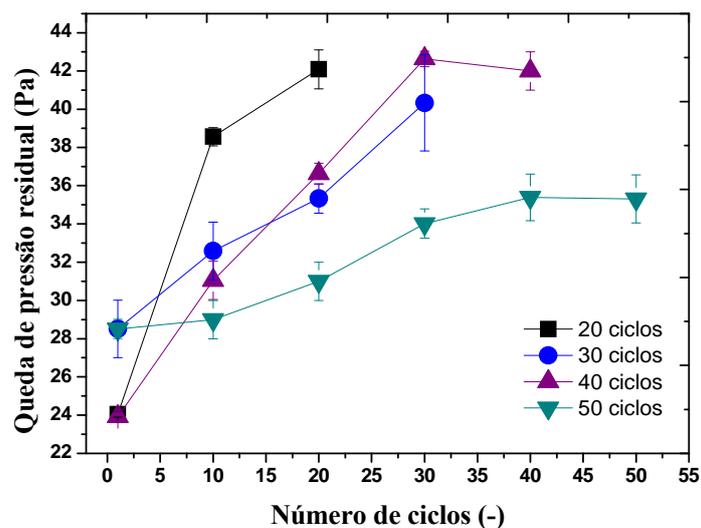


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Pela análise desta figura, observou-se entre os 1º ciclos uma significativa diferença, assim como entre os últimos ciclos de filtração, isto pode ter ocorrido pela diferença de compactação do meio filtrante durante sua fabricação, já que para cada ensaio foi utilizado uma parte diferente do tecido. Também se verificou que o perfil da curva do 1º ciclo apresentou o comportamento esperado. Devido à filtração de profundidade, o tempo de filtração foi maior e a curva apresentou concavidade para cima. As curvas dos últimos ciclos apresentaram-se distintas às curvas do 1º ciclo de filtração e limpeza, possuindo concavidade voltada para baixo, referente ao aumento côncavo da queda de pressão, devido à distribuição das partículas no meio filtrante no ciclo inicial e foi necessário um menor tempo de filtração quando comparado a curva do 1º ciclo, utilizando os mesmos parâmetros operacionais. Comportamento similar foi observado no trabalho de SALLEM *et al* (2011), utilizando também a pressão de pulso de 4 bar.

Sabe-se que o acréscimo no número de ciclos pode promover um aumento na queda de pressão residual, este comportamento está apresentado na Figura 4.19 e pode ser atribuído ao material particulado presente no interior do meio filtrante. São estes, filetes de partículas que não podem ser removidas totalmente pela limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 4.19 - Comportamento da queda de pressão residual em função dos 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza no tecido de polipropileno.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

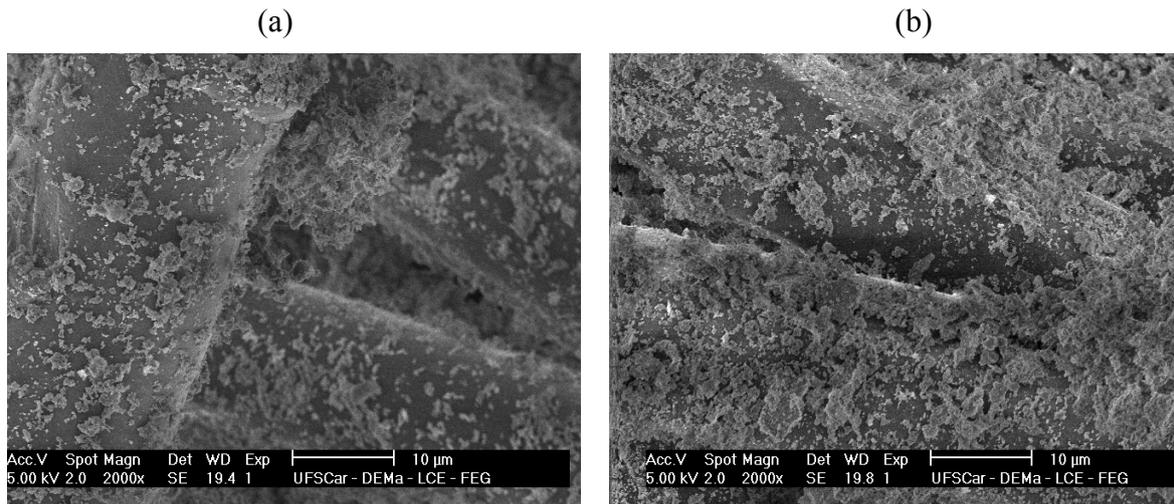
Após cada limpeza por pulso de ar reverso, a queda de pressão no filtro caiu para o valor residual, designada por queda de pressão residual. Observando a Figura 4.19, pode-se verificar que o tecido utilizado para realização dos 50 ciclos de filtração e limpeza apresentou-se mais poroso em relação aos meios filtrantes utilizados nos demais ensaios e isto pode ser atribuído aos menores valores de queda de pressão residual. Também observando esta figura, foi nítida a tendência de aumento da queda de pressão com o acúmulo de partículas nas fibras do feltro de polipropileno. Através desse resultado pode-se perceber que se obteve boa concordância com o estudo de CALLÉ *et al* (2002), pois este verificou que o tecido com superfície tratada aumentou seu tempo de utilização através da redução da tendência de aumento da queda de pressão residual. Mesmo apresentando uma tendência de aumento da queda de pressão residual, esta não foi significativa a ponto de interromper a funcionalidade do meio filtrante durante a filtração.

A clara tendência do acréscimo da deposição da quantidade de material particulado após a limpeza por pulso de ar reverso, formando a massa de pó residual, e conseqüentemente, provocando a queda de pressão residual depois da limpeza, pode ser observada pela Figura 4.20.

Na Figura 4.20 são mostradas as imagens vistas da parte superior do tecido com aumento de 2000x. Na Figura 4.20 (a) é apresentada a imagem do tecido após 10 ciclos

de filtração e limpeza. Já na Figura 4.20 (b) é mostrada a imagem do tecido com infiltração das partículas no feltro de polipropileno, bem como a sua deposição nas fibras do tecido, após a operação de filtração e limpeza por pulso de ar reverso utilizado em 50 ciclos de filtração e limpeza.

Figura 4.20 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) após 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) depois de utilizado em 50 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

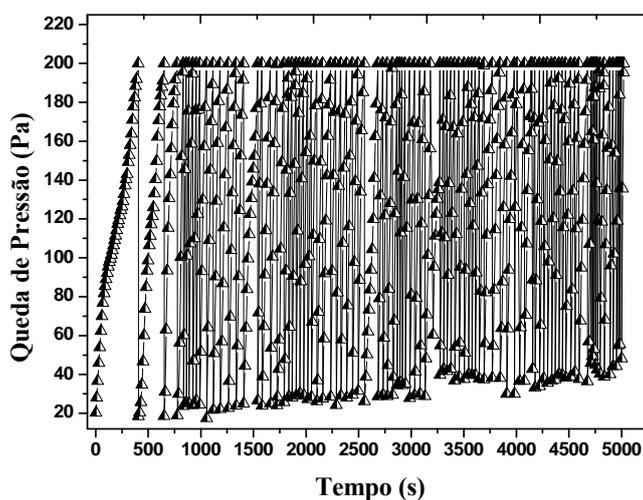
Observando as imagens da Figura 4.20, verificou-se que as partículas de concentrado fosfático ficaram retidas nas fibras do feltro de polipropileno, mesmo submetidas a 50 pulsos de ar para sua remoção. Na Figura 4.20 (a) observou-se menores aglomerados de partículas nas fibras do feltro de polipropileno em relação à Figura 4.20 (b). Por isso, com o aumento do número de ciclos de filtração e limpeza tornou-se mais difícil a remoção de material particulado. Além disso, houve um aumento na massa retida, assim como na queda de pressão residual, não apresentando tendência de estabilizar ao longo dos 50 ciclos de filtração e limpeza, utilizando a queda de pressão de 200 Pa, a velocidade de 4 cm/s e o tempo de pulso de 200 ms.

4.2.4. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

Os 100 ciclos de filtração e limpeza apresentaram o comportamento mostrado na Figura 4.21 e foram realizados com concentrado fosfático em tecido de polipropileno sob as mesmas condições dos ensaios anteriores. Utilizando estes mesmos parâmetros operacionais, foram realizados ensaios com 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza, respectivamente como mostrado na Figura 4.22 e Figura 4.23. Estes acréscimos no número de ciclos de filtração e limpeza foram para garantir um grande intervalo de tempo empregando o mesmo filtro, permitindo assim observar o desgaste do meio filtrante após filtrações e limpezas.

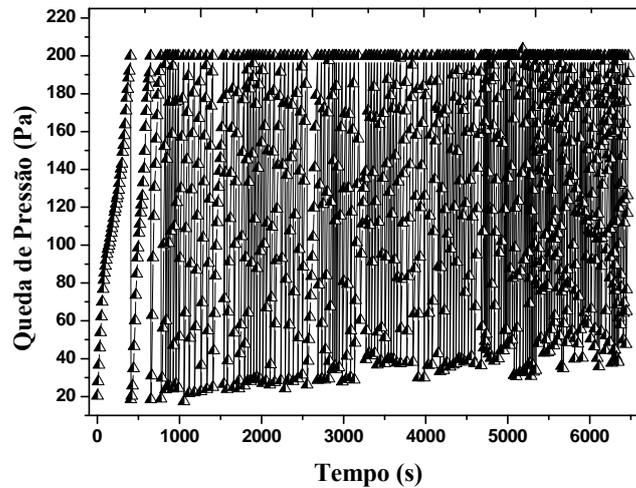
No trabalho de KAVOURAS e KRAMMER (2005) pode-se observar o comportamento semelhante aos apresentados nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23. Neste trabalho, os autores utilizaram a pressão de pulso de 4 a 5 bar, a queda de pressão no filtro de 1070 a 1200 Pa, a vazão do gás de 0,7 a 1,4 m³/s, a velocidade de filtração de 0,46 a 0,91 m/min, a área do filtro de 92 m² e a duração do pulso de 0,1 s. E atribuíram este comportamento à limpeza do meio filtrante por pulso de ar reverso.

Figura 4.21 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 100 ciclos de filtração e limpeza no Polipropileno.



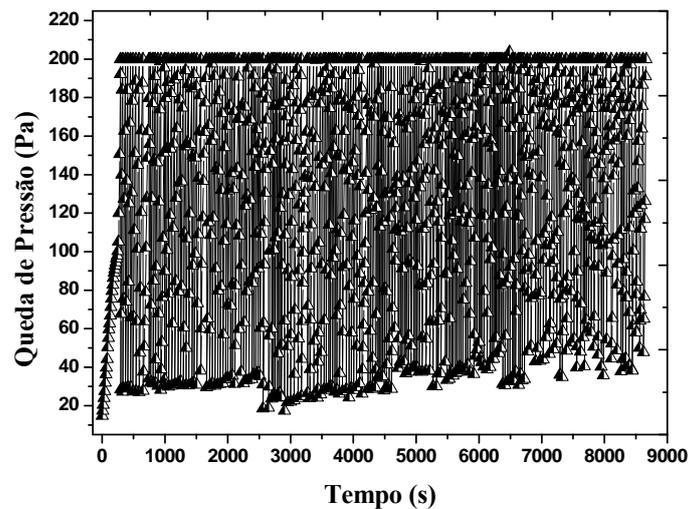
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.22 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 150 ciclos de filtração e limpeza no Polipropileno.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.23 - Queda de pressão em função do tempo, para os 200 ciclos de filtração e limpeza no Polipropileno.

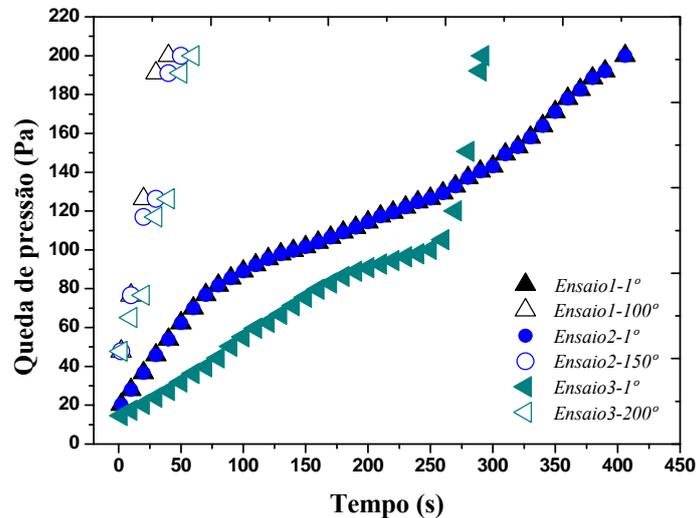


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Assim como mostrado nos demais ensaios, utilizando o feltro de polipropileno em 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza, também se observa o comportamento típico da filtração de profundidade nos primeiros ciclos com a curva de filtração voltada para cima, não linearidade e maior tempo de filtração. Já os últimos ciclos, 100º, 150º e 200º, respectivamente, apresentam a concavidade voltada para baixo e menor tempo de filtração. Estes comportamentos estão mostrados na Figura 4.24 e podem ser atribuídos

à interferência direta da massa residual, ou seja, da massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 4.24 - Comparação entre o 1º ciclo e o 100º, 150º e 200º ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso no Polipropileno.



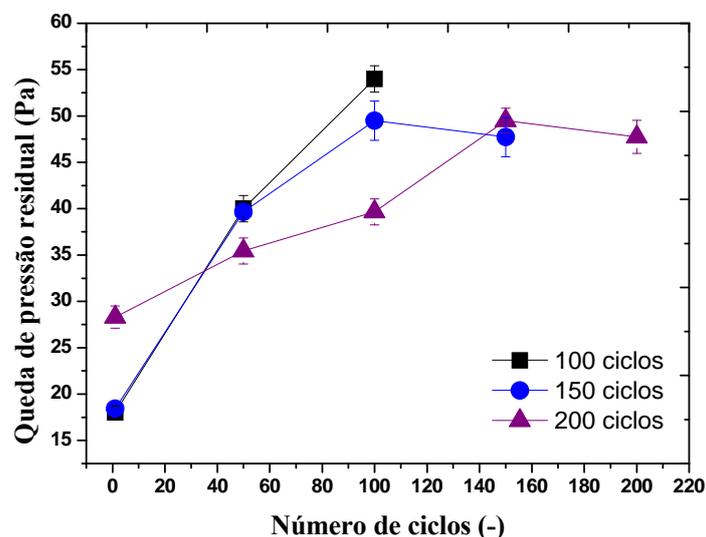
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Como ocorrido para os 50 ciclos realizados utilizando os mesmos parâmetros operacionais, os 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza apresentaram nos primeiros ciclos uma diferença considerável, assim como entre os últimos ciclos de filtração (100º, 150º e 200º ciclo). Possivelmente este comportamento pode ser atribuído à diferença de compactação do meio filtrante durante sua fabricação. O ensaio de 200 ciclos de filtração e limpeza necessita da realização de réplica, pois este apresentou grande diferença no 1º ciclo, já o ensaio de 100 e 150 ciclos apresentaram boa reprodutibilidade.

Além do observado, também se verificou uma tendência considerável dos ciclos de filtração se tornarem cada vez menores, devido ao acréscimo da queda de pressão residual, conseqüência do acúmulo da massa residual. Esta tendência já estabelecida por CALLÉ *et al* (2002), em que a massa da torta necessária para alcançar a queda de pressão foi decrescente em função do número de ciclos, tendendo a tornar-se constante. Comportamento semelhante foi observado por ROCHA (2010), em 100 ciclos de filtração e limpeza à velocidade de filtração de 5 e 15 cm/s, utilizando a técnica de limpeza por fluxo de ar reverso no feltro de poliéster e como material particulado, o

concentrado fosfático. Na Figura 4.25 é mostrada a influência do acréscimo do número de ciclos no aumento da queda de pressão residual.

Figura 4.25 - Queda de pressão residual em função dos dois ensaios, referente aos ensaios a 100, 150 e a 200 ciclos de filtração e limpeza.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

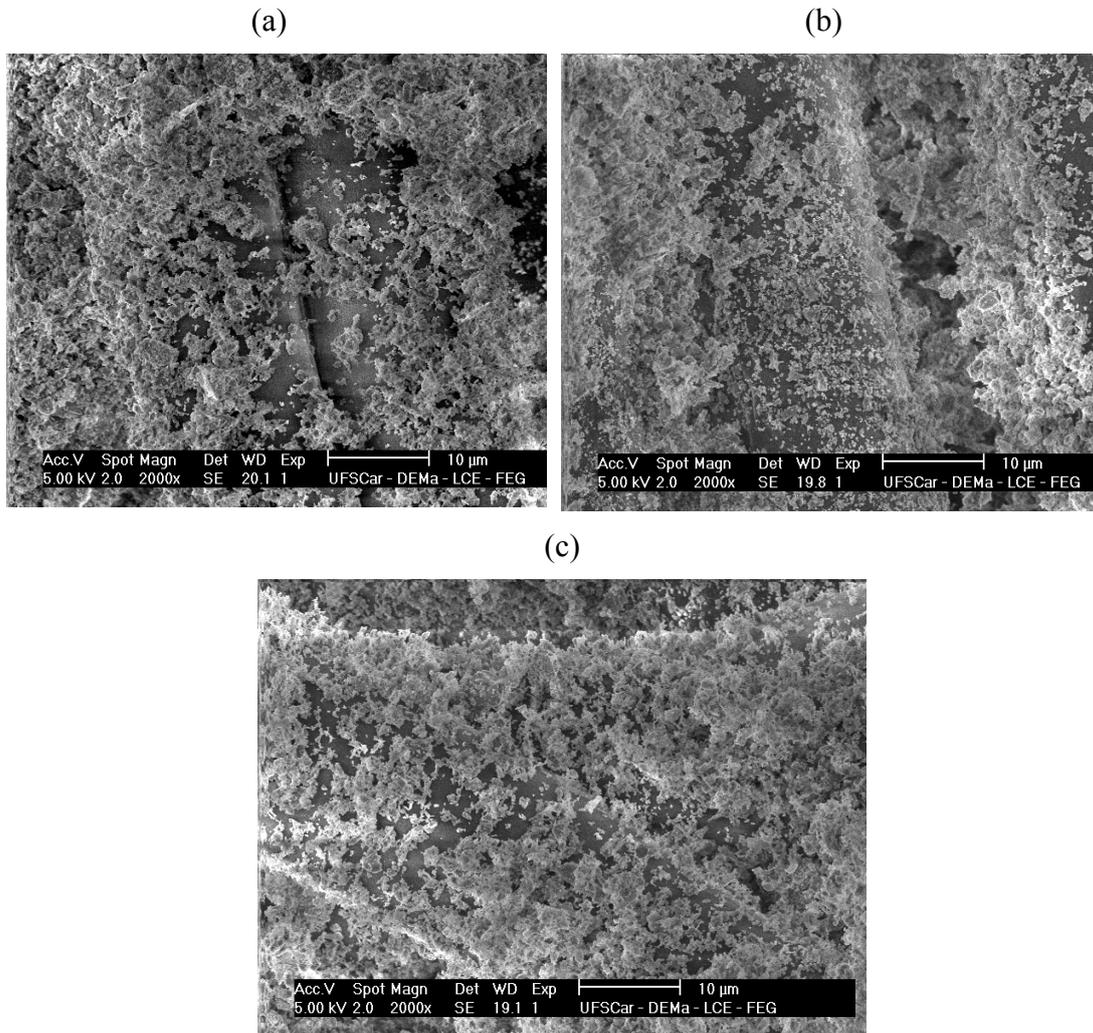
Neste caso, como era de se esperar, a queda de pressão residual e a massa retida após a limpeza apresentam uma tendência de aumento do 100º ciclo ao 150º ciclo e do 150º ao 200º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Na Figura 4.26 são apresentadas as imagens obtidas pelo MEV do feltro de polipropileno, após 100, 150 e 200 ciclos de filtração de limpeza por pulso de ar reverso.

Através da Figura 4.26 (a) nota-se que as partículas de concentrado fosfático recobrem quase totalmente as fibras do feltro de polipropileno, após os 100 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Este mesmo comportamento do feltro de polipropileno pode ser verificado nas Figuras 4.26 (b) e 4.26 (c), mas em maior quantidade de aglomerados de partículas e menos regiões contendo espaços vazios, principalmente após os 200 ciclos de filtração e limpeza. Assim, pode-se observar a influência do número de ciclos de filtração e limpeza na regeneração do feltro de polipropileno.

A seguir são apresentadas as análises dos resultados obtidos para 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, quanto à massa retida, a massa depositada, a

massa desprendida, a porosidade e a resistência específica da torta, além da permeabilidade do meio filtrante.

Figura 4.26 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) após 100 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, (b) após 150 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (c) após 200 ciclos de filtração e limpeza,

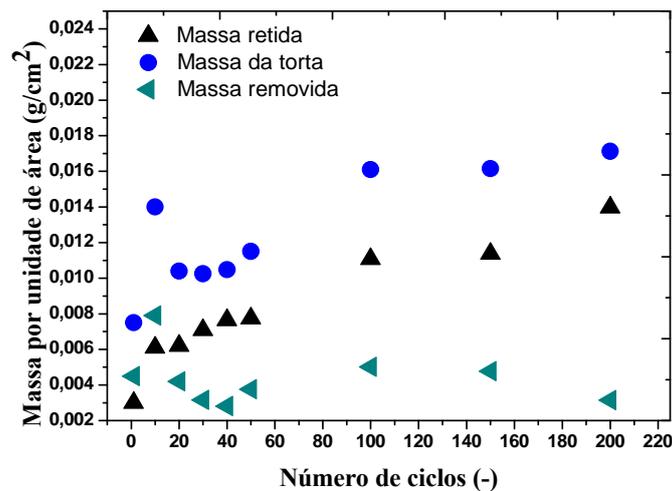


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

4.2.5. Análises dos filtros de polipropileno após filtração e limpeza por pulso de ar reverso

Para melhor verificação do comportamento das curvas de filtração e limpeza, após os 200 ciclos de filtração e limpeza, obteve-se a massa de particulado retida, a massa da torta e a massa desprendida por unidade de área no filtro de tecido. Em uma amostra de filtro realizou-se a filtração sem limpeza, alcançando a massa da torta. Em outro, se realizou a filtração com a limpeza por jato pulsante obtendo a massa retida. Através da diferença entre estas massa obteve-se a massa desprendida, utilizando os mesmos parâmetros operacionais. Na Figura 4.27 são mostradas a massa retida, a massa depositada (torta) e a massa desprendida de acordo com o número de ciclos.

Figura 4.27 - Comportamento do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso na massa por unidade de área e na queda de pressão residual.

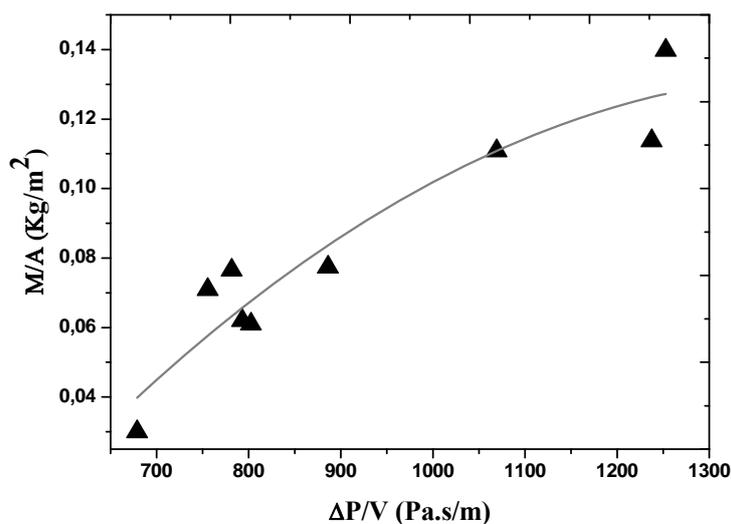


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Com acréscimo no número de ciclos de filtração e limpeza a massa retida apresentou uma tendência significativa de aumento, como resultado da retenção das partículas nas fibras do meio filtrante e da saturação do conjunto torta-tecido. De acordo, com TIENI (2005), a adesão torta-tecido determina a quantidade de energia que necessita ser colocada na operação de limpeza. Portanto, para suprir totalmente a interação intermolecular torta-tecido, pode haver a exigência de uma maior pressão de pulso e maior tempo de pulso, que permita assim uma remoção mais eficaz das partículas após muitos ciclos de filtração e limpeza.

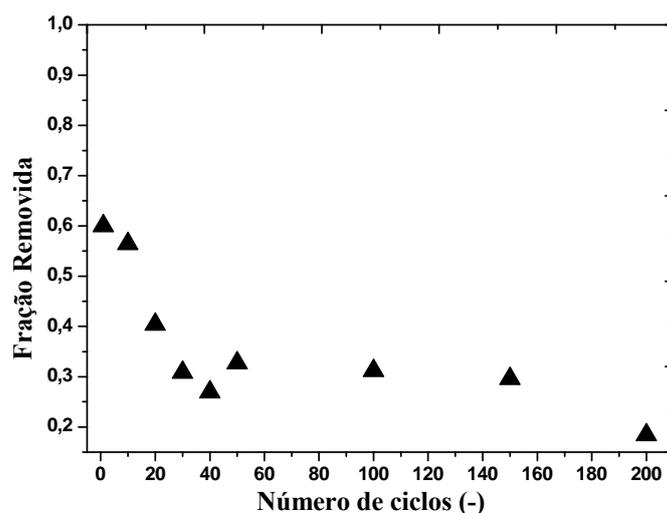
Como consequência do acúmulo de partículas nos ciclos iniciais, este resultou na ocorrência do aumento da queda de pressão residual, esta tendeu a apresentar um comportamento semelhante ao da curva da massa retida, e tornou-se aproximadamente constante nos ciclos finais. Este fato revela uma relação entre a massa retida e a queda de pressão residual, como mostra a Figura 4.28.

Figura 4.28 - Relação entre a queda de pressão residual e a massa retida para o polipropileno e rocha fosfática.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Através das Figuras 4.27 e 4.28 verificou-se que o comportamento da massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso, reflete diretamente na queda de pressão residual. Contudo, a massa de pó alimentada foi constante e o equipamento de filtração e limpeza por pulso de ar reverso apresentou um bom desempenho na remoção de particulado, já que a quantidade de massa removida teve um valor satisfatório, conforme apresentado na Figura 4.29, onde é mostrada a relação da eficiência de remoção de pó por pulso de ar reverso em função do acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza.

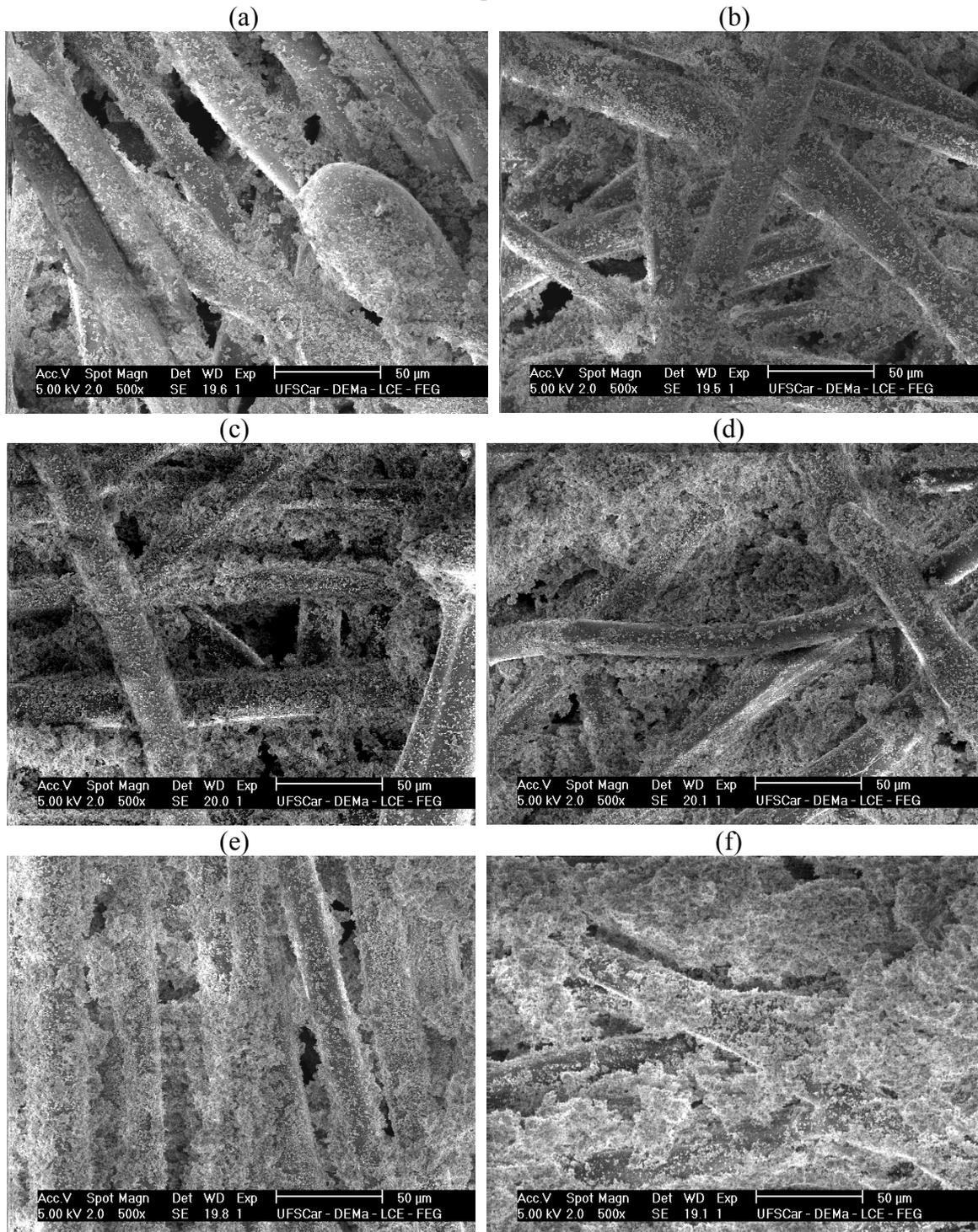
Figura 4.29 - Fração de massa removida da torta em função do número de ciclos, no Polipropileno.

Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A fração removida foi o principal parâmetro utilizado para caracterizar a eficiência de regeneração do meio filtrante. Verificou-se que a eficiência de limpeza, não foi constante ao longo dos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso e apresentou a tendência de diminuir com o acréscimo dos ciclos de filtração e limpeza. A maior eficiência de remoção de partículas foi de 60% no primeiro ciclo de filtração e limpeza, isto devido o primeiro ciclo conter menor quantidade de material particulado na superfície do feltro de polipropileno. Logo a menor eficiência de limpeza foi de aproximadamente 20% após 200 ciclos de filtração e limpeza, condizendo à massa retida no filtro após a limpeza por pulso de ar reverso e a queda de pressão residual. Portanto, pode-se dizer que a eficiência de limpeza depende da espessura da torta de filtração. Como mostrado na Figura 4.29 a diminuição da eficiência de limpeza com o número de ciclos, foi resultado do aumento da massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso.

No entanto, deve-se ressaltar que a espessura da torta formada foi pequena, o que pode ser visualizado pelos baixos valores de massa depositada por unidade de área na filtração. Estes valores reduzidos de eficiência de limpeza podem ser atribuídos pela quantidade significativa de material particulado que permaneceu no interior do meio filtrante. Isto pode ser verificado na Figura 4.30. A Figura 4.30 mostra com perceptibilidade a ocorrência de partículas nas camadas superficiais do feltro de polipropileno, bem como a permanência das partículas de concentrado fosfático muito próximo as fibras.

Figura 4.30 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV após os ciclos de filtração e limpeza em (a) 1 ciclo, (b) 10 ciclos, (c) 50 ciclos, (d) 100 ciclos, (e) 150 ciclos, e (f) 200 ciclos, com ampliação de 500x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Em seguida, a cada ensaio de filtração e limpeza foi verificado o diâmetro médio das partículas retidas na superfície do feltro de polipropileno e este não apresentou a

tendência de aumentar com o número de ciclos. O diâmetro médio das partículas foi de aproximadamente 3 μm em todos os ciclos de filtração e limpeza realizados.

Considerando a seção linear das curvas de filtração em todos os ciclos, pode-se fazer uma avaliação da resistência específica da torta em cada ciclo. Também se obteve a porosidade da torta em função do número de ciclos de filtração e limpeza. Na Figura 4.31 é mostrada a influência do número de ciclos na resistência específica da torta e na porosidade da torta de filtração. A resistência específica da torta foi calculada pelo arraste (S) em função da massa da torta por unidade de área (W), através do coeficiente angular da curva. A porosidade da torta foi calculada pela Equação de Ergun Modificada para cada ponto da curva de queda de pressão em função do tempo de filtração. Os dados utilizados nos cálculos estão na Tabela 4.2.

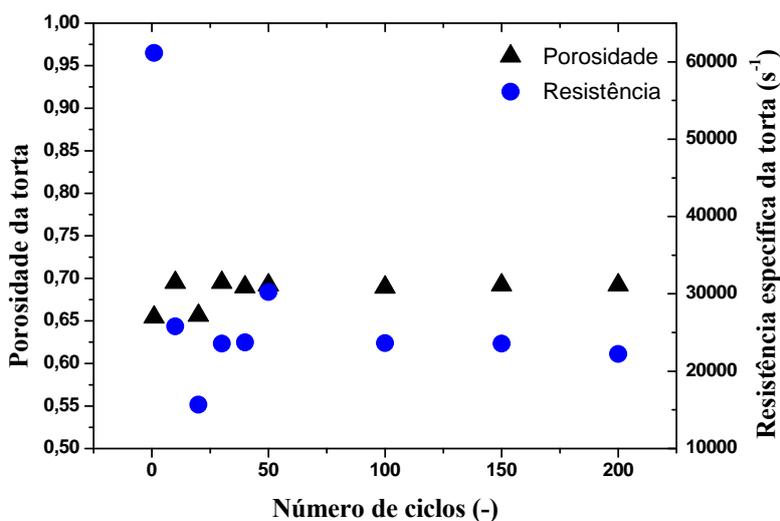
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados nos cálculos da resistência específica da torta de filtração.

Dados utilizados	Valores
Área do filtro (m^2)	0,0227
Velocidade de filtração (m/s)	0,0400
Viscosidade (Kg/ m.s)	$1,80 \times 10^{-05}$
Diâmetro médio de partícula (m)	$3,09 \times 10^{-06}$
Densidade de partícula (Kg/ m^3)	3,13

Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Para o feltro de polipropileno verificou-se que a taxa da resistência específica da torta foi inversamente proporcional a massa filtrada. A redução da duração dos ciclos de filtração pode ser resultado não apenas do aumento da resistência específica da torta do 1º ao 20º ciclo, mas também do acúmulo de partículas no feltro de polipropileno. Esta constatação se confirmou ao observar a massa retida após a limpeza, na Figura 2.27. A massa depositada (torta) apresenta a tendência de tornar-se constante a partir do 100º ciclo, coincidindo ao ciclo em que a resistência específica da torta e a porosidade da torta de filtração.

Figura 4.31 - Número de ciclos de filtração em função da resistência específica e da porosidade da torta de filtração.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.31 constatou-se que o valor da resistência específica da torta tendeu a diminuir com o número de ciclos. Já a porosidade da torta de filtração apresentou um aumento com o número de ciclos. Este resultado era esperado, devido à quantidade de material particulado retida no filtro, causando a diminuição do período de filtração interna e aumentando a rapidez de formação da torta na superfície.

Como se utilizou a mesma velocidade de filtração para todos os ciclos de filtração e limpeza e a velocidade foi relativamente baixa, isto pode ter influenciado diretamente na porosidade da torta. De acordo com, ITO (2002) utilizando velocidade de filtração entre 5 e 15 cm/s, a velocidade mais alta apresentou tortas menos porosas. E, segundo DONOVAN (1985), velocidades baixas facilitam na remoção da torta por ação da limpeza do meio filtrante, pois diminui a interação torta-tecido.

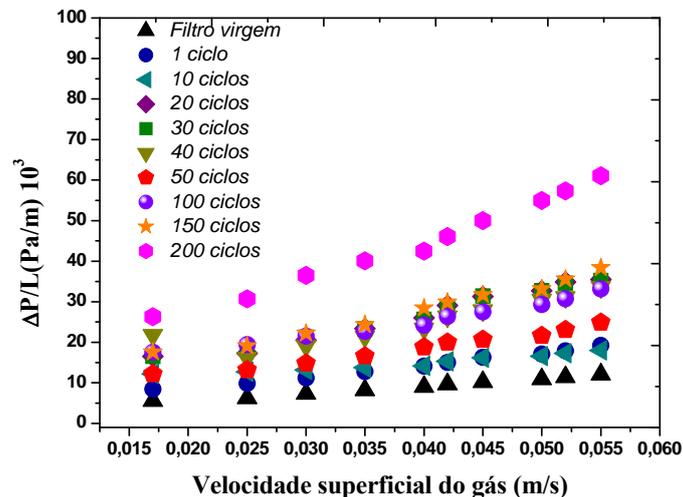
Um dos objetivos da limpeza por pulso de ar reverso foi manter a permeabilidade inicial do meio filtrante, por isso utilizou-se velocidade baixa de filtração. Desta forma, determinou-se a permeabilidade de filtro novo e do filtro após a filtração e limpeza, como forma de verificar as alterações após a limpeza por pulso de ar reverso na estrutura do tecido.

Nos ensaios de permeação do filtro de polipropileno, primeiramente estes foram realizados utilizando o ar comprimido como fluido gasoso e sem adição de material particulado. As velocidades superficiais variaram de 1,7 a 6,0 cm/s e obtiveram-se

valores de queda de pressão (ΔP) em função da vazão volumétrica (Q_V), em que foram convertidos para a velocidade superficial por $V_s = Q_V / A_F$.

Utilizando o conjunto de valores experimentais ($\Delta P \times V_s$) realizou-se a observação dos comportamentos das curvas da queda de pressão normalizada ($\Delta P/L$) em função da velocidade superficial de filtração como estão apresentados na Figura 4.32 para o ensaio com o meio filtrante polipropileno virgem (Ensaio 1) e para o meio filtrante após 1 (Ensaio 2), 10 (Ensaio 3), 20 (Ensaio 4), 30 (Ensaio 5), 40 (Ensaio 6), 50 (Ensaio 7), 100 (Ensaio 8), 150 (Ensaio 9) e 200 (Ensaio 10) ciclos de filtração e limpeza.

Figura 4.32- Curva para determinar a permeabilidade do meio filtrante polipropileno.



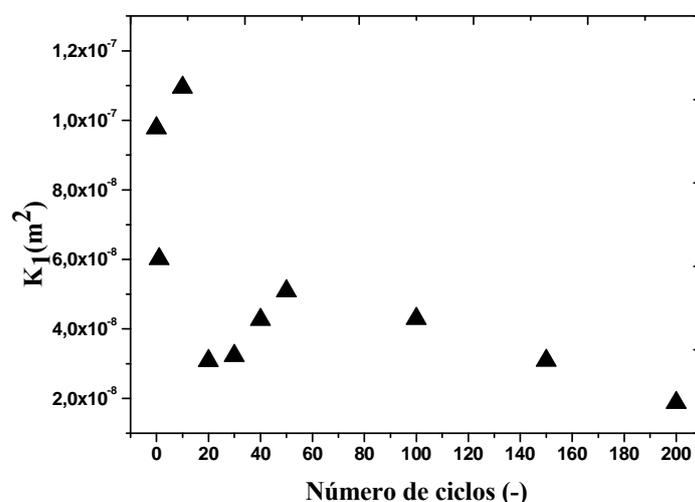
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

De acordo com a Figura 4.32 pode-se constatar que, o aumento da velocidade superficial de filtração garantiu um acréscimo na queda de pressão do feltro de polipropileno. O aumento observado de queda de pressão foi devido às contribuições do termo inercial. Comportamento este também verificado por TANABE (2011), em ensaios de filtração a alta pressão, utilizando concentrado fosfático como material particulado e como meio filtrante utilizou-se poliéster, polipropileno, metálico e celulose.

Os resultados apresentados pela Figura 4.32 foram obtidos a partir de três experimentos de permeação para cada meio filtrante. No apêndice A estão inseridos os outros ensaios de permeação realizados neste estudo.

Pelo ajuste das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial no filtro, obteve-se a permeabilidade Darciana (K_1) em função do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, como mostrado na Figura 4.33.

Figura 4.33 - Permeabilidade Darciana em função do número de ciclos de filtração e limpeza, no feltro polipropileno.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Pela análise da Figura 4.33, observa-se que a permeabilidade Darciana (K_1) apresentou variações até o número de ciclos de 200. Não tendendo a valores constantes. De acordo com BUONICORE e DAVIS (1992), a permeabilidade dos meios filtrantes se reduz com a massa residual, isto justifica a pequena diferença entre o filtro limpo (sem ser utilizado) e o filtro usado na filtração.

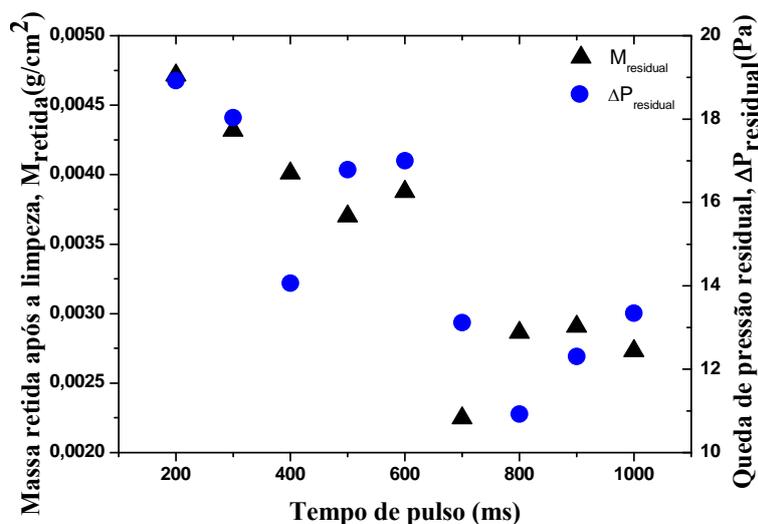
Isto mostra que o meio filtrante após 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso sofreu pouca deformação. Este comportamento foi razoável, considerando que se utilizou velocidade baixa durante os ensaios experimentais (1,7 cm/s a 6 cm/s) e a queda de pressão de 200 Pa não foi suficiente para causar total deformação nos meios filtrantes. Por isso, pode-se dizer que mesmo após 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso o feltro polipropileno possivelmente mantém boa qualidade na captura das partículas.

4.3. Ensaio de filtração e limpeza no feltro de acrílico

Com intuito de comparar o comportamento apresentado utilizando o feltro de polipropileno na filtração e limpeza por pulso de ar reverso, realizaram-se os mesmos experimentos com o feltro de acrílico. Escolheu-se o feltro de acrílico por apresentar características estruturais semelhantes ao feltro de polipropileno.

Na Figura 4.34 é apresentada a massa retida após a limpeza e a queda de pressão residual em função do tempo de pulso. Durante estes experimentos utilizou-se velocidade de filtração de 4 cm/s e a queda de pressão de 200 Pa constante. Apenas alterou-se o tempo de pulso na operação de remoção de partículas do feltro de acrílico. O tempo de pulso empregado foi entre 200 ms e 1.000 ms, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Figura 4.34 – Massa retida e Queda de pressão residual em função do tempo de pulso, para o tecido de acrílico.



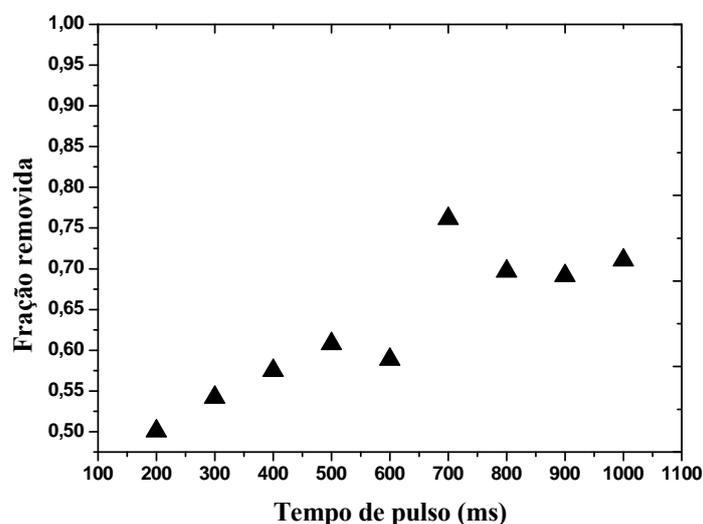
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.34 pode-se notar o decréscimo da massa retida e da queda de pressão residual com o tempo de pulso. Os maiores tempos de pulso durante a operação de limpeza do feltro de acrílico resultaram em menores quantidades de massa retida, utilizando a pressão de pulso constante em todos os ensaios de filtração e limpeza. Comparado ao feltro de polipropileno, o feltro de acrílico apresentou maior quantidade de massa retida após a limpeza e menor queda de pressão residual, em todos os ensaios.

A partir da massa retida analisou-se o diâmetro médio das partículas retidas sobre as fibras do feltro de acrílico e este se apresentou o diâmetro médio volumétrico igual a 3,0 μm , semelhante ao valor encontrado no feltro de polipropileno.

Outra constatação a partir da massa retida está relacionada à massa desprendida durante a limpeza, que pode ser representada pela fração removida em função do tempo de pulso. Este parâmetro é de extrema importância na avaliação da eficiência de remoção por pulso de ar reverso. Na Figura 4.35 é apresentada a fração removida em função do tempo de pulso, utilizando o feltro de acrílico.

Figura 4.35 - Fração removida em função do tempo de pulso, no feltro de acrílico.

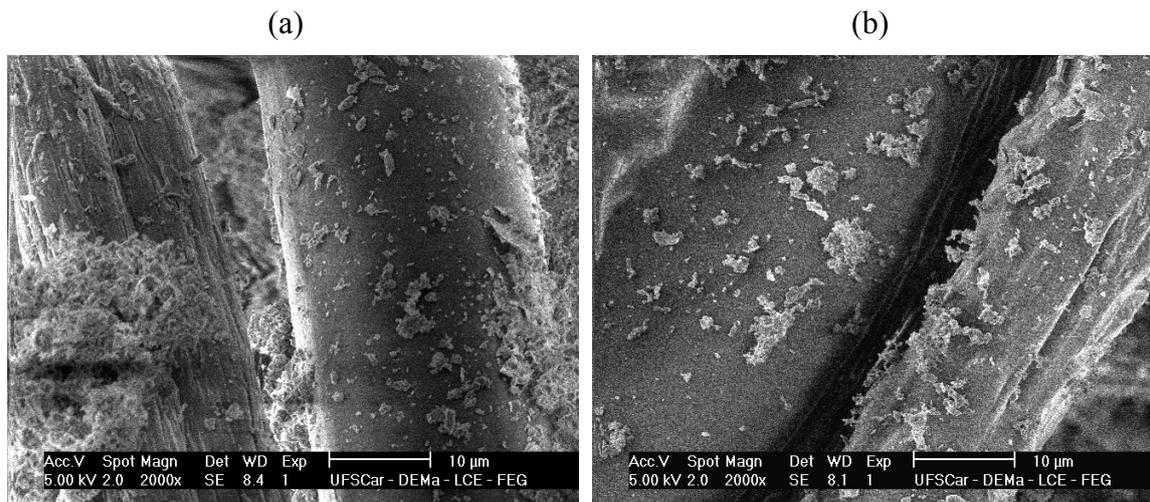


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

De acordo com a Figura 4.35 o tempo de pulso de 200 ms apresentou uma eficiência de limpeza de aproximadamente 50%. Já para o tempo de pulso de 1.000 ms este valor aumentou para aproximadamente 71%. Comparado a estes resultados, o polipropileno apresentou uma eficiência de limpeza maior.

Assim como já era esperado, o maior tempo de pulso utilizando a mesma pressão de pulso se mostra mais eficiente na remoção do concentrado fosfático. E isto pode ser observado na Figura 4.36, onde são mostradas as fotografias gerados no MEV do feltro de acrílico, submetido a 200 ms de tempo de pulso e 1000 ms de tempo de pulso.

Figura 4.36 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a tempo de pulso de 200 ms com ampliação de 2000x, (b) a tempo de pulso de 1000 ms com ampliação de 2000x.



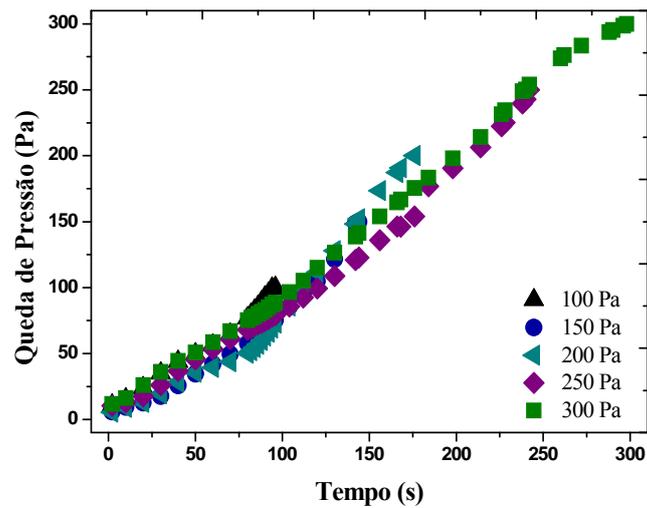
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Com isto, verificou-se que o tempo de pulso interfere no sucesso da limpeza, como verificado por BERBNER *et al* (1996). A Figura 4.36 (a) apresentou maior quantidade de partículas retidas no feltro de acrílico em relação à Figura 4.36 (b). Esta observação foi praticamente semelhante ao verificado no polipropileno.

Posteriormente à alteração no tempo de pulso, foram realizadas modificações na queda de pressão e na velocidade de filtração. Assim, os parâmetros que foram mantidos constantes durante o acréscimo do tempo de pulso também foram alterados e mantendo constante o tempo de pulso, correspondente a 200 ms.

Na Figura 4.37 são apresentados os ensaios de filtração e limpeza utilizando a velocidade de filtração de 4 cm/s e o tempo de pulso de 200 ms, para diferentes valores de queda de pressão. Nota-se nesta figura, o acréscimo da queda de pressão acompanhado pelo aumento do tempo de filtração, ou seja, mostra-se um comportamento típico da filtração, devido o aumento da queda de pressão máxima em função do aumento do tempo de filtração. Assim como para o tecido de polipropileno, observam-se curvas de filtração com comportamentos diferentes do início da mesma. Apesar disto, este se apresenta menor diferença comparada ao polipropileno, isto pode ter ocorrido devido à maior semelhança de compactação do tecido de acrílico na sua fabricação.

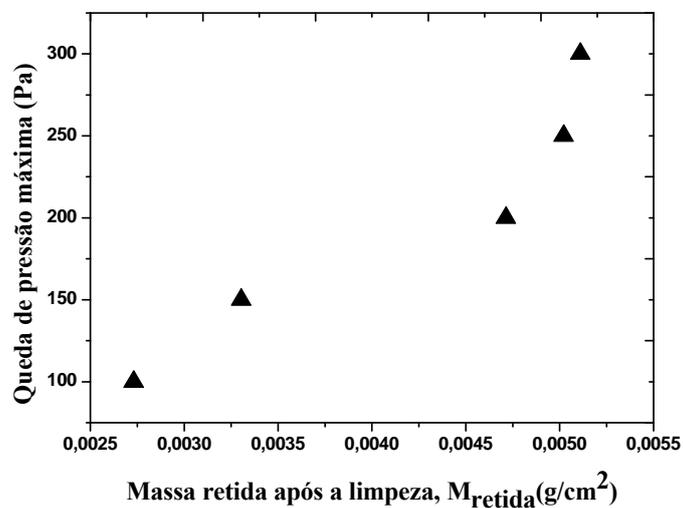
Figura 4.37 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, variando a queda de pressão.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

O acréscimo da queda de pressão máxima permitiu observar o aumento da massa retida após a limpeza, como mostra a Figura 4.38.

Figura 4.38 – Massa retida por unidade de área após a limpeza em função da queda de pressão máxima.

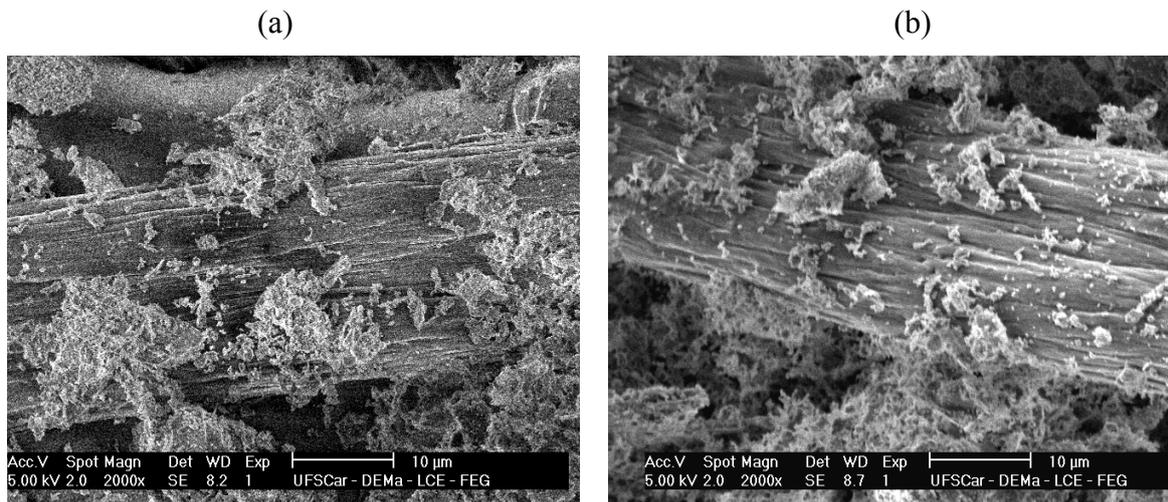


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

O aumento da massa retida observado na Figura 4.38, possivelmente ocorreu devido o aumento da quantidade de partículas depositadas na superfície do meio filtrante pelo aumento da queda de pressão. Na Figura 4.39 são apresentadas as imagens

superficiais do feltro de acrílico, geradas no MEV com ampliação de 2.000x, queda de pressão máxima de 100 Pa e 300 Pa, velocidade de 4 cm/s e tempo de pulso de 200 ms.

Figura 4.39 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após um ciclo de filtração e limpeza (a) a queda de pressão de 100 Pa com ampliação de 2000x, (b) a queda de pressão de 300 Pa com ampliação de 2000x.



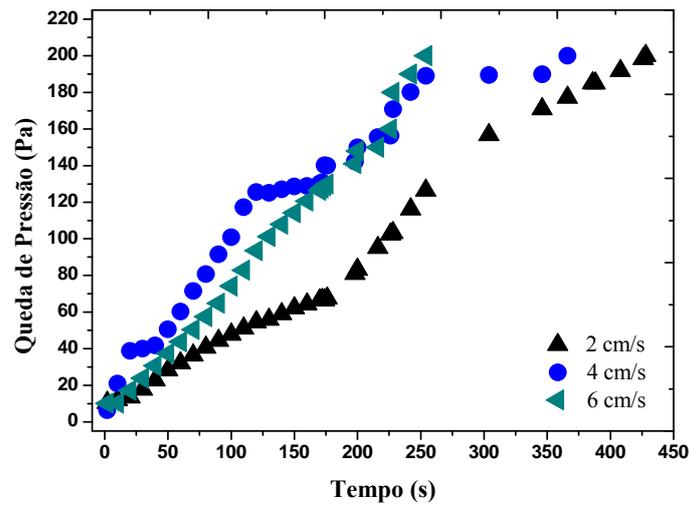
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Analisando a Figura 4.39 (a) pode-se observar que os aglomerados de concentrado fosfático sobre a fibra do feltro de acrílico mostraram-se em menor concentração em relação à Figura 4.39 (b).

Na Figura 4.40 são apresentados os ensaios de filtração e limpeza utilizando a queda de pressão de 200 Pa, o tempo de pulso de 200 ms, a pressão de 4 bar, em diferentes velocidades de filtração, entre 2 e 6 cm/s.

Observa-se nas Figuras 4.37 e 4.40 variações no tempo de filtração durante os ensaios de filtração e limpeza. Como já eram esperados, os ensaios com a variação da queda de pressão apresentaram o acréscimo do tempo de filtração e este tempo de filtração foi maior que para o polipropileno. Já com aumento da velocidade de filtração, decresce o tempo de filtração, típico da operação de filtração e este também se apresenta maior que em relação ao polipropileno, utilizando os mesmos parâmetros operacionais.

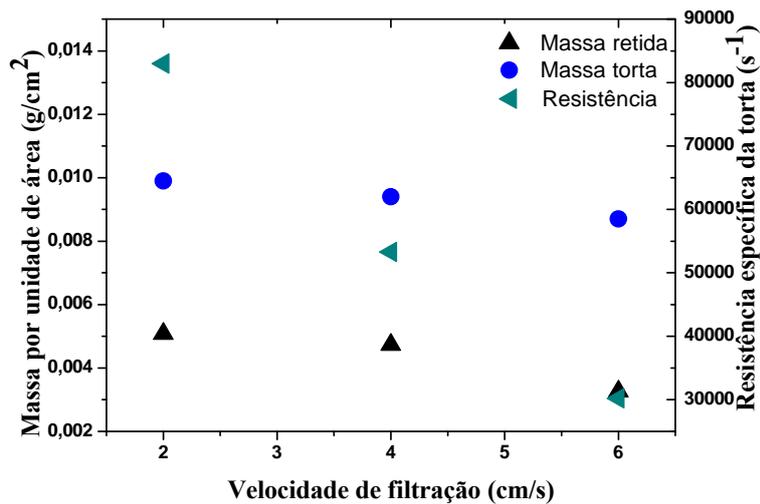
Figura 4.40 - Perfil das curvas de filtração e limpeza, variando a velocidade de filtração.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Durante estes experimentos, observou-se diferença nos perfis de filtração e limpeza, por isso verificou-se a massa retida após a limpeza, a massa da torta e a resistência específica da torta em função do acréscimo da velocidade de filtração como mostrado na Figura 4.41.

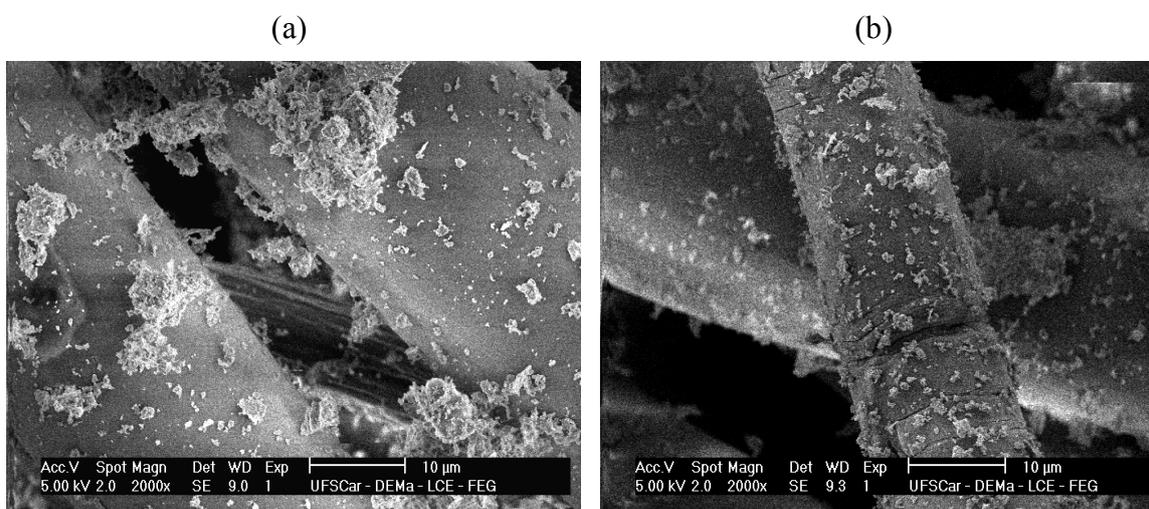
Figura 4.41 –A massa retida, a massa da torta e a resistência específica da torta em função da velocidade de filtração.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Analisando a Figura 4.41 pode-se constatar que o acréscimo da velocidade de filtração, proporcionou o decréscimo da massa da torta de filtração e da massa retida após a limpeza, assim como o decréscimo da resistência específica da torta. Este comportamento também foi verificado utilizando o tecido de polipropileno. A presença da massa retida após a limpeza pode ser verificada na Figura 4.42, através das imagens da superfície do meio filtrante acrílico, à velocidade de 2 e 6 cm/s.

Figura 4.42- Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após 1 ciclo de filtração e limpeza (a) a velocidade 2 cm/s com ampliação de 2000x, (b) a velocidade 6 cm/s com ampliação de 2000x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Observando a Figura 4.42 (b), pode-se verificar claramente a menor penetração de partículas de concentrado fosfático utilizando uma maior velocidade de filtração, por apresentar poucas partículas aderidas às fibras após a limpeza por pulso de ar reverso. Por isso, utilizando a velocidade de filtração maior que 2 cm/s pode-se facilitar a remoção de partículas de concentrado fosfático por pulso de ar reverso no tecido de acrílico e permitir uma boa eficiência de limpeza, da mesma forma que o feltro de polipropileno.

Posteriormente aos resultados apresentados para 1 ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com as alterações dos parâmetros operacionais, optou-se em limitar a queda de pressão a 200 Pa, a velocidade de filtração a 4 cm/s, a pressão do pulso de 4 bar e o tempo de pulso a 200 ms para avaliar o comportamento do feltro de acrílico com o acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza.

4.4. Influência do número de ciclos de filtração e limpeza no tecido de acrílico

Os resultados do comportamento do feltro de acrílico relacionados ao acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, estão apresentados a seguir, utilizando a queda de pressão máxima de 200 Pa, a velocidade de filtração de 4 cm/s e o tempo de pulso de 200 ms.

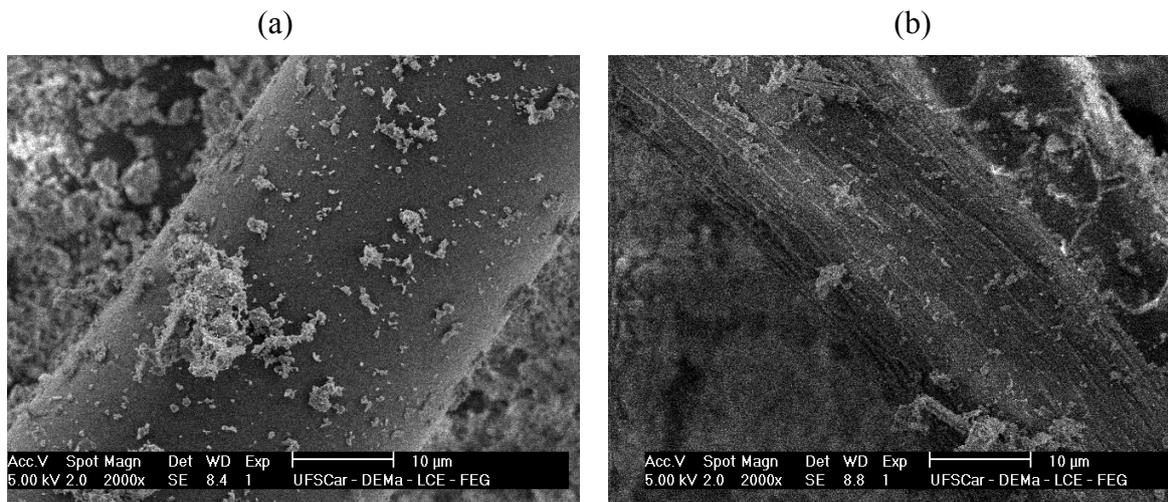
4.4.1. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 1º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

Esta seção baseia-se em um ciclo de filtração e limpeza no tecido de acrílico e apresenta o desempenho do equipamento de pulso de ar reverso durante a filtração, e a detecção do acréscimo da quantidade de material particulado nas fibras do meio filtrante. Este comportamento do feltro de acrílico pode ser observado na Figura 4.43.

A Figura 4.43 (a) apresenta a imagem da superfície do feltro de acrílico submetido ao 1º ciclo de filtração sem limpeza por pulso de ar reverso. Já a Figura 4.43 (b) apresenta a imagem da superfície do feltro de acrílico após a limpeza por pulso de ar reverso. Nesta figura é mostrada claramente a diferença do comportamento dos tecidos com filtração e após a limpeza.

Desta forma, pode-se observar a ação da limpeza por pulso de ar reverso no desprendimento das partículas de concentrado fosfático, através da menor quantidade de partículas retidas no rearranjo das fibras do tecido após a limpeza. As partículas que permaneceram nas fibras após a operação de limpeza, formaram a massa residual, e conseqüentemente, apresentou-se a queda de pressão residual. Comportamento semelhante a este pode ser verificado no trabalho de MARTINS (2001), utilizando fluxo de ar reverso como operação de limpeza de filtros de tecido.

Figura 4.43 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV (a) em um ciclo de filtração, antes da limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) em 1 ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com ampliação de 2000x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

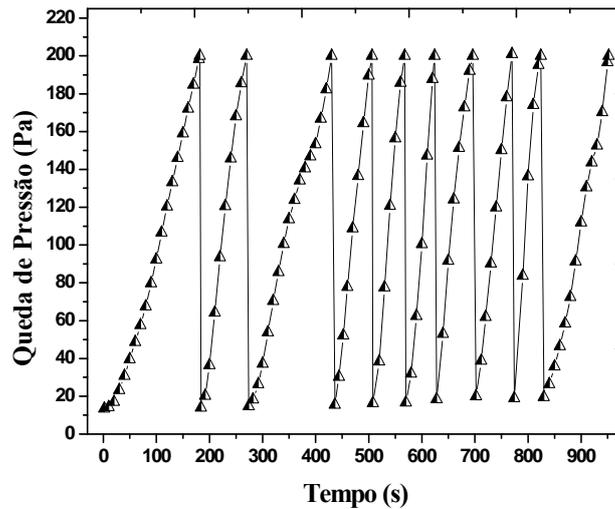
4.4.2. Queda de pressão em função do tempo de filtração - 10º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

Os resultados para os 10 ciclos de filtração e limpeza estão apresentadas na Figura 4.44. Estes foram realizados à queda de pressão máxima de 200 Pa, a um tempo de pulso de 200 ms, à pressão de pulso de 4 bar e à velocidade de filtração de 4 cm/s.

Na Figura 4.44 pode ser observado o comportamento das curvas de filtração do acrílico (qualitativamente semelhante ao do polipropileno), devido o aumento da queda de pressão com o aumento do tempo de filtração. O tempo de filtração para os 10 ciclos de filtração e limpeza foi de aproximadamente 950 s, valor este maior que para o polipropileno.

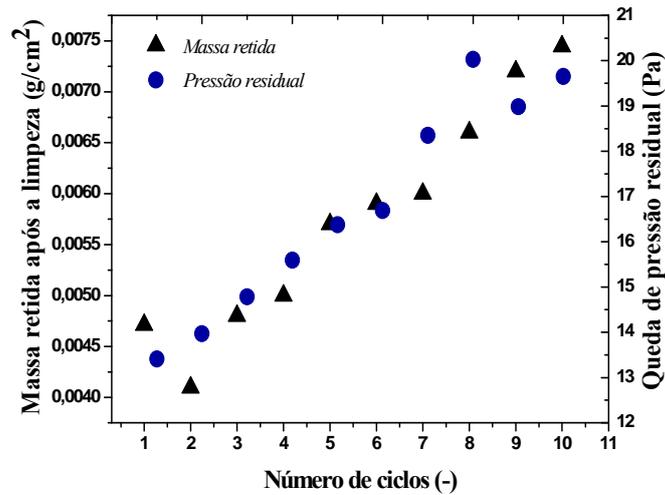
Também nesta figura, foi constatada a tendência de aumento da queda de pressão residual, referente ao concentrado fosfático retido no interior do feltro de acrílico com o número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Na Figura 4.45 são mostrados os 10 ciclos de filtração e limpeza em relação à queda de pressão residual e a massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 4.44 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 10 ciclos.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.45 – 10 ciclos em função da massa retida após a limpeza e da queda de pressão residual.



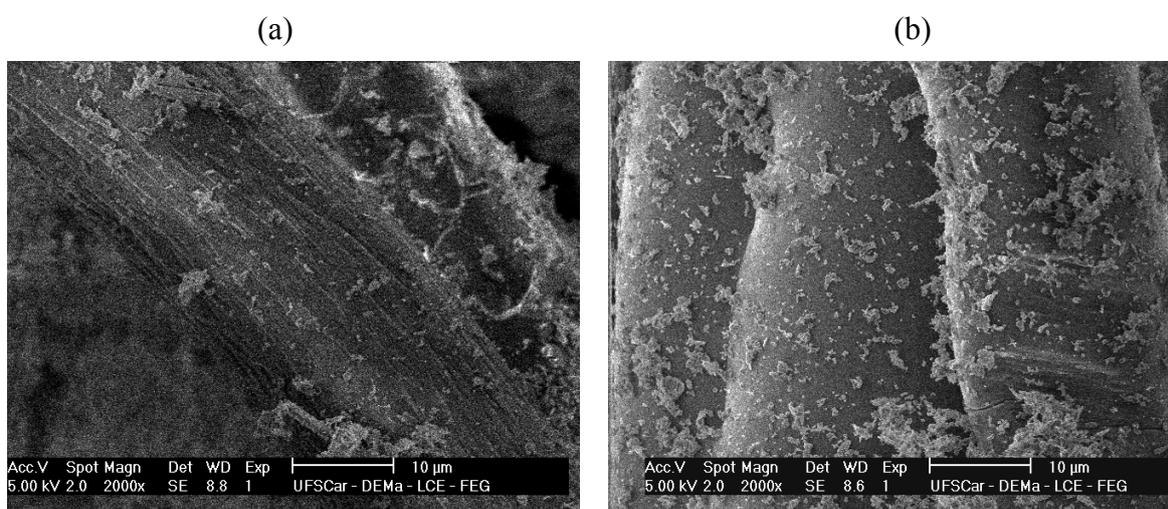
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Notou-se claramente na Figura 4.45 a tendência do aumento da queda de pressão residual em todos os 10 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Isto ocorreu pelo acúmulo da massa retida após a limpeza, ou seja, devido à retenção das partículas de concentrado fosfático no interior do feltro de acrílico, dificultando a remoção da torta de filtração (GINESTET e PUGNET, 2012). A queda de pressão residual não ultrapassou 21 Pa e a massa retida não excedeu 0,0075 g/cm². A tendência

de aumento da massa retida e da queda de pressão com o número de ciclos também foi observada no polipropileno. Logo a queda de pressão residual para o polipropileno foi maior e a massa retida mostrou-se menor.

Através da imagem gerada no MEV pode-se comparar o 1º e o 10º ciclo. O 10º ciclo de filtração e limpeza apresentou maior quantidade de massa retida em relação ao 1º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, como mostrado na Figura 4.46.

Figura 4.46 - Fotografias da superfície do feltro de polipropileno geradas no MEV, (a) em um ciclo de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) em 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

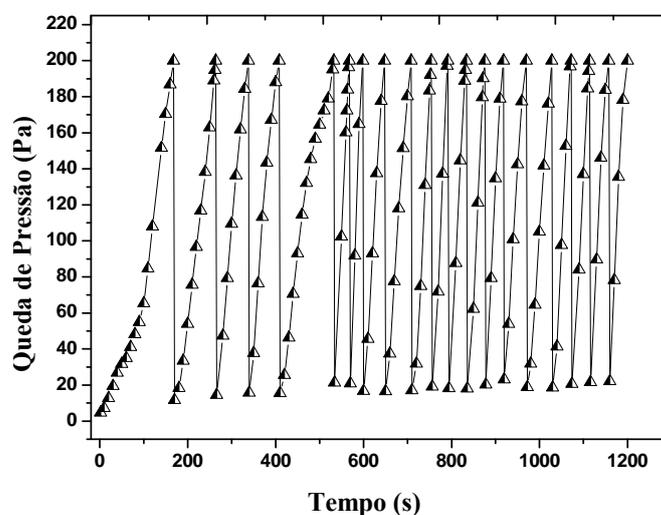
Na Figura 4.46 (b) pode-se observar maiores aglomerados de partículas sobre as fibras superficiais em relação à Figura 4.46 (a). Verificou-se assim que o número de ciclos interfere diretamente na massa retida e na queda de pressão residual. Por isso, quanto menor a utilização do tecido na filtração e limpeza por jato pulsante, menor apresenta-se a retenção de partículas sobre as fibras e o desgaste do meio filtrante (GINESTED e PUGNET, 2012).

4.4.3. Queda de pressão em função do tempo de filtração em 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

Os resultados obtidos para o feltro de acrílico nos 20, 30, 40 e 50 ciclos realizados com rocha fosfática, à queda de pressão máxima de 200 Pa, um tempo de pulso de 200 ms, à pressão de pulso de 4 bar e à velocidade de filtração de 4 cm/s, estão apresentados nas Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50. Após o 20º ciclo de filtração e limpeza o acrílico mostra-se mais rápido, ou seja, menor tempo de filtração foi necessário em relação ao polipropileno, observando 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

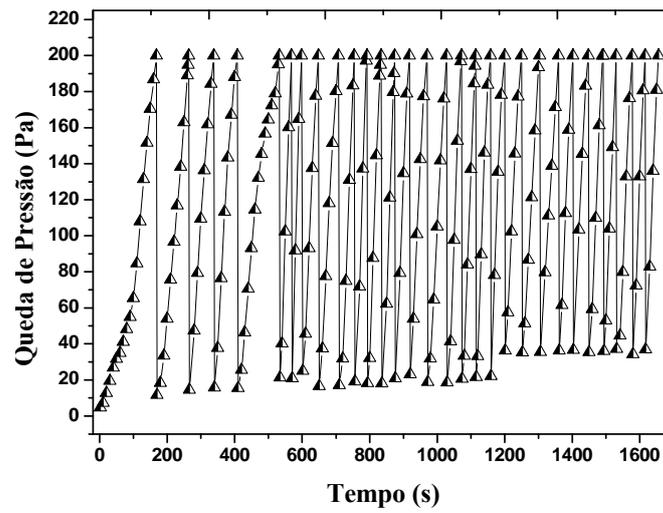
Através das Figuras 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50, observa-se o 1º ciclo de filtração com concavidade para cima e maior tempo de filtração. Este comportamento pode ser visualizado com melhor clareza por meio da Figura 4.51.

Figura 4.47 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 20 ciclos de filtração e limpeza, no acrílico.



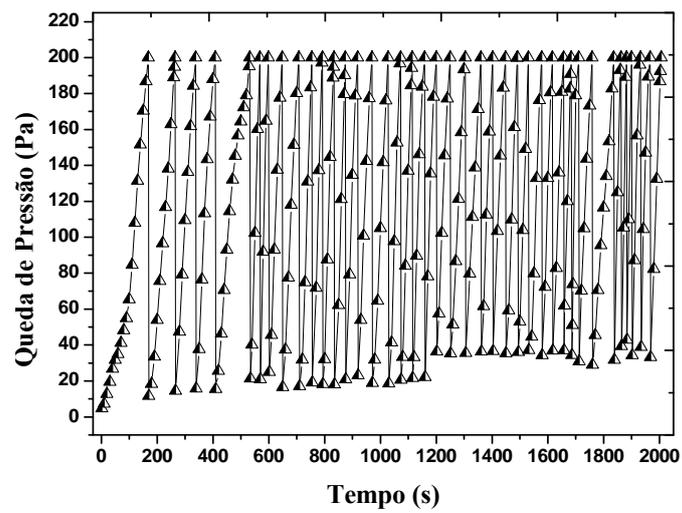
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.48 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 30 ciclos de filtração e limpeza.



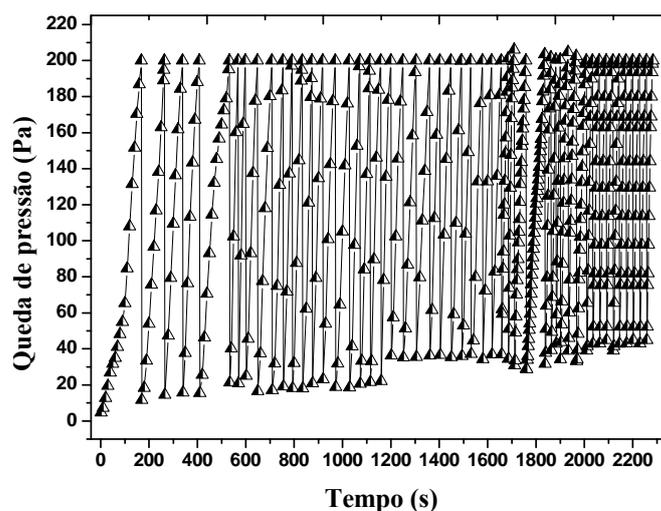
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.49 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 40 ciclos de filtração e limpeza.



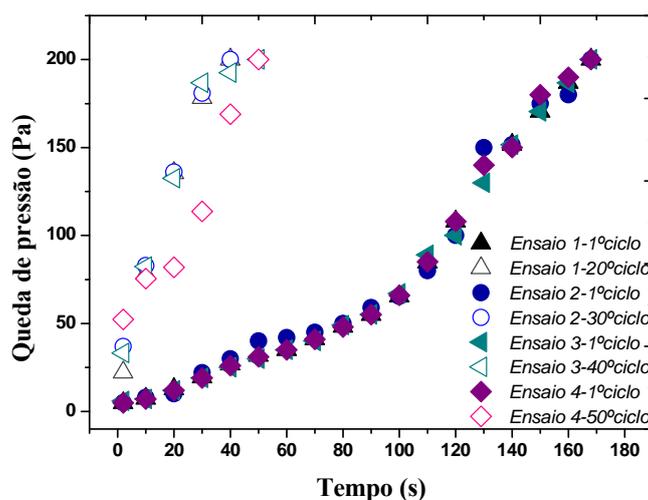
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.50 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 50 ciclos de filtração e limpeza.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.51 - Comparação entre o 1º ciclo e o 20º, o 30º, o 40º e o 50º ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.



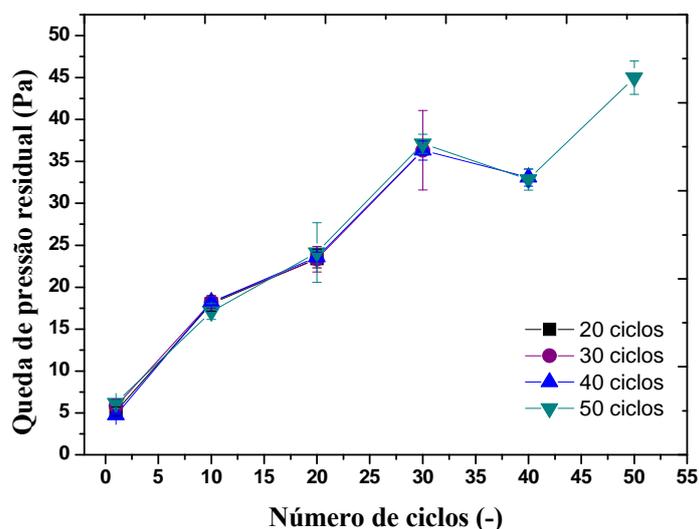
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A Figura 4.51 permitiu verificar a boa reprodutibilidade do perfil de filtração do 1º ciclo para todos os ensaios de filtração em 20, 30, 40 e 50 ciclos respectivamente, além do último ciclo de filtração em todos estes ensaios de filtração. Outra constatação a partir desta figura refere-se à concavidade voltada para cima e não linear nos 1º ciclos de filtração e limpeza e a concavidade para baixo no 20º, 30º, 40º e 50º ciclo de filtração

e limpeza por pulso de ar reverso. Este tecido mostrou-se mais homogêneo comparado ao polipropileno, por ter apresentado melhor reprodutibilidade das curvas de filtração e limpeza.

O acréscimo do número de ciclos possibilitou também o acréscimo da queda de pressão residual, conseqüência da massa residual no interior do meio filtrante que não foi removida pela limpeza a pulso de ar reverso. A Figura 4.52 possibilita observar a tendência linear de aumento da queda de pressão residual com o número de ciclos. Este comportamento explica porque os ciclos de filtração ficam cada vez mais curtos para o acrílico e também pode ser atribuído ao fechamento dos poros da superfície do tecido após cada ciclo de filtração e limpeza.

Figura 4.52 - Comportamento da queda de pressão residual em função dos 20, 30, 40 e 50 ciclos de filtração e limpeza no acrílico.

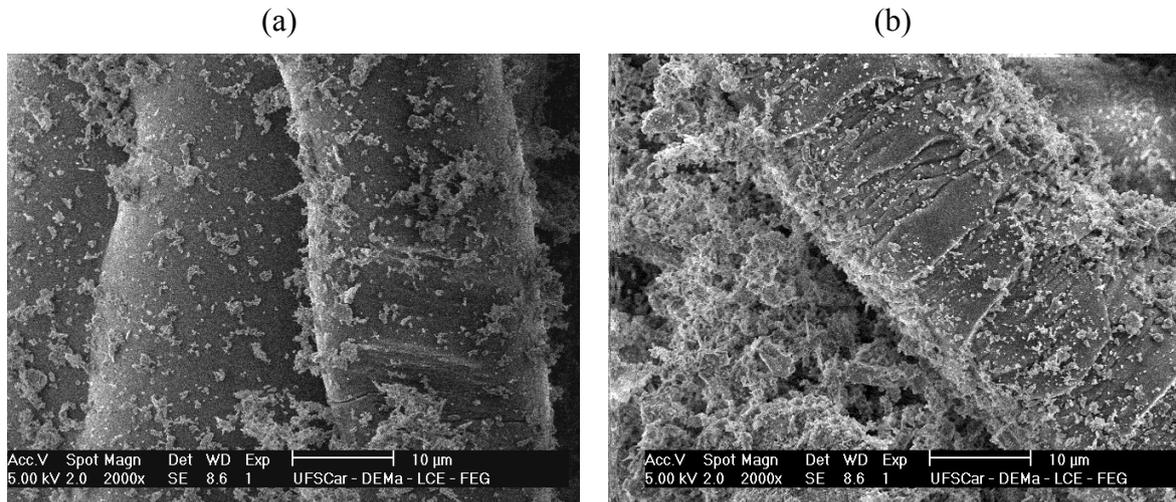


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.53 são mostradas as imagens geradas no MEV com ampliação de 2000x utilizando feltro de acrílico. A Figura 4.53 (a) apresenta a foto do tecido após 10 ciclos de filtração e limpeza. Já a Figura 4.53 (b) mostra a foto do tecido submetido aos 50 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Nestas imagens verifica-se a acomodação das partículas de concentrado fosfático nas camadas mais superficiais do feltro de acrílico, que ocorreu em torno das fibras. Porém as partículas também se encontraram retidas nas camadas mais internas do tecido. Isto pode ser atribuído a presença de diferentes mecanismos de captura de partículas durante a filtração. Assim

como observado no polipropileno, após 50 ciclos de filtração e limpeza o acrílico também apresenta maior quantidade de partículas.

Figura 4.53 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV, (a) após 10 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x, e (b) depois de utilizado em 50 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2000x.

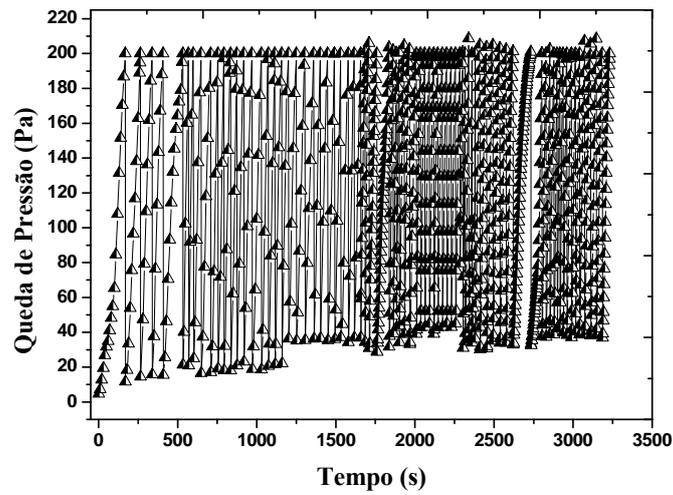


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

4.4.4. Queda de pressão em função do tempo de filtração em 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso

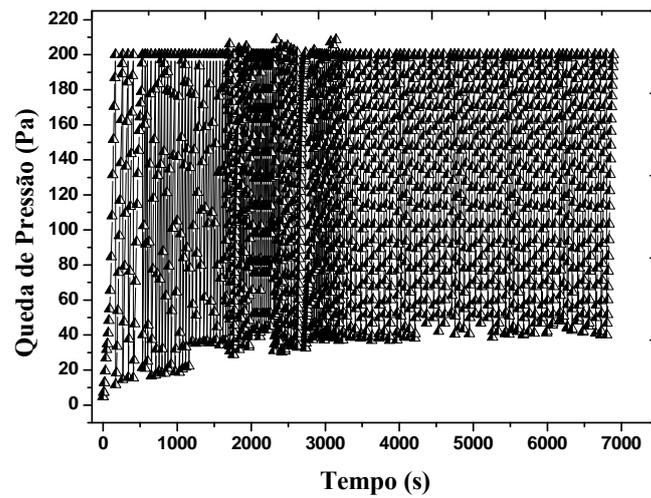
Os 100 ciclos de filtração e limpeza apresentaram o comportamento da Figura 4.54, utilizando o feltro de acrílico, o concentrado fosfático, a queda de pressão máxima de 200 Pa, a velocidade de filtração de 4 cm/s, o tempo de pulso de 200 ms e a pressão de pulso de 4 bar. Utilizando estes mesmos parâmetros observou-se a queda de pressão em função do tempo de filtração como mostrado nas Figuras 4.55 e 4.56, para 150 e 200 ciclos respectivamente.

Figura 4.54 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 100 ciclos de filtração e limpeza, no acrílico.



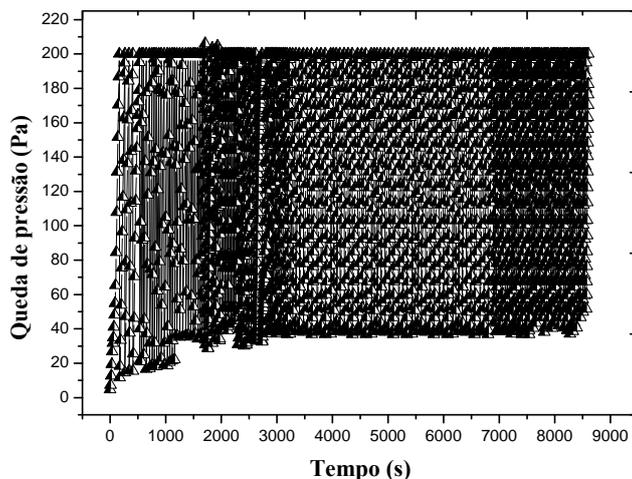
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.55 – Queda de pressão em função do tempo de filtração, para 150 ciclos de filtração e limpeza.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

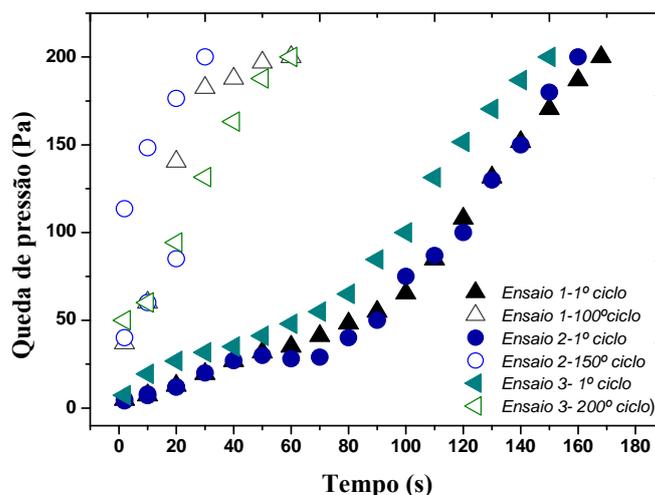
Figura 4.56 - Queda de pressão em função do tempo de filtração, em 200 ciclos de filtração e limpeza.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Da mesma forma observada nos ciclos anteriores, foi possível verificar a diferença entre o 1º ciclo e o último, em todos os ensaios. O 1º ciclo de filtração e limpeza apresenta a curva com concavidade para cima, não linearidade e maior tempo de filtração. E nos últimos ciclos (100º, 150 e 200º) apresentam a curva com concavidade para baixo e o menor tempo de filtração. Estes comportamentos estão apresentados na Figura 4.57.

Figura 4.57 - Comparação entre o 1º e os 100º, 150º e 200º ciclos de filtração e limpeza no acrílico.



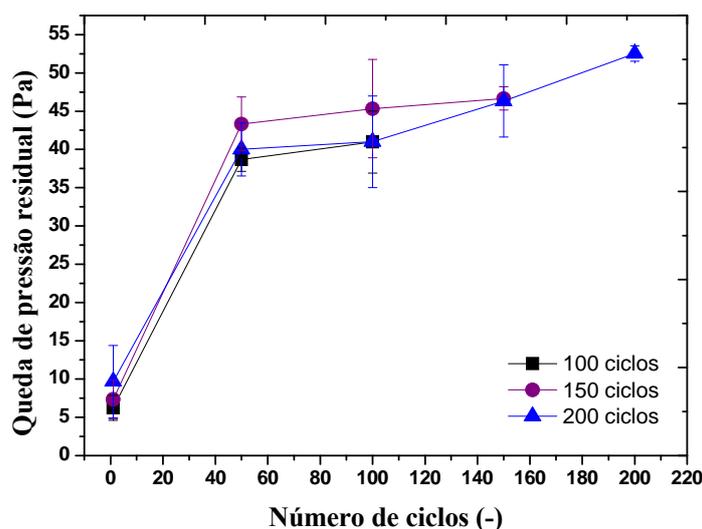
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Analisando a Figura 4.57 foi possível observar uma diferença entre os 1º ciclos de filtração e limpeza, possivelmente devido à diferença de compactação entre os meios filtrantes durante a fabricação. Apesar disto, o acrílico apresentou-se mais homogêneo em relação ao polipropileno.

Na Figura 4.58 é mostrada a influência do aumento do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso no aumento da queda de pressão residual.

Como esperado, a queda de pressão residual e a massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso apresentaram uma tendência significativa de aumento do 100º ciclo ao 200º ciclo de filtração e limpeza. A Figura 4.59 mostra as imagens obtidas pelo MEV do feltro de acrílico que permitem observar este resultado.

Figura 4.58 - Queda de pressão residual em função dos três ensaios, referente aos ensaios a 100, 150 e 200 ciclos de filtração e limpeza a pulso de ar reverso.

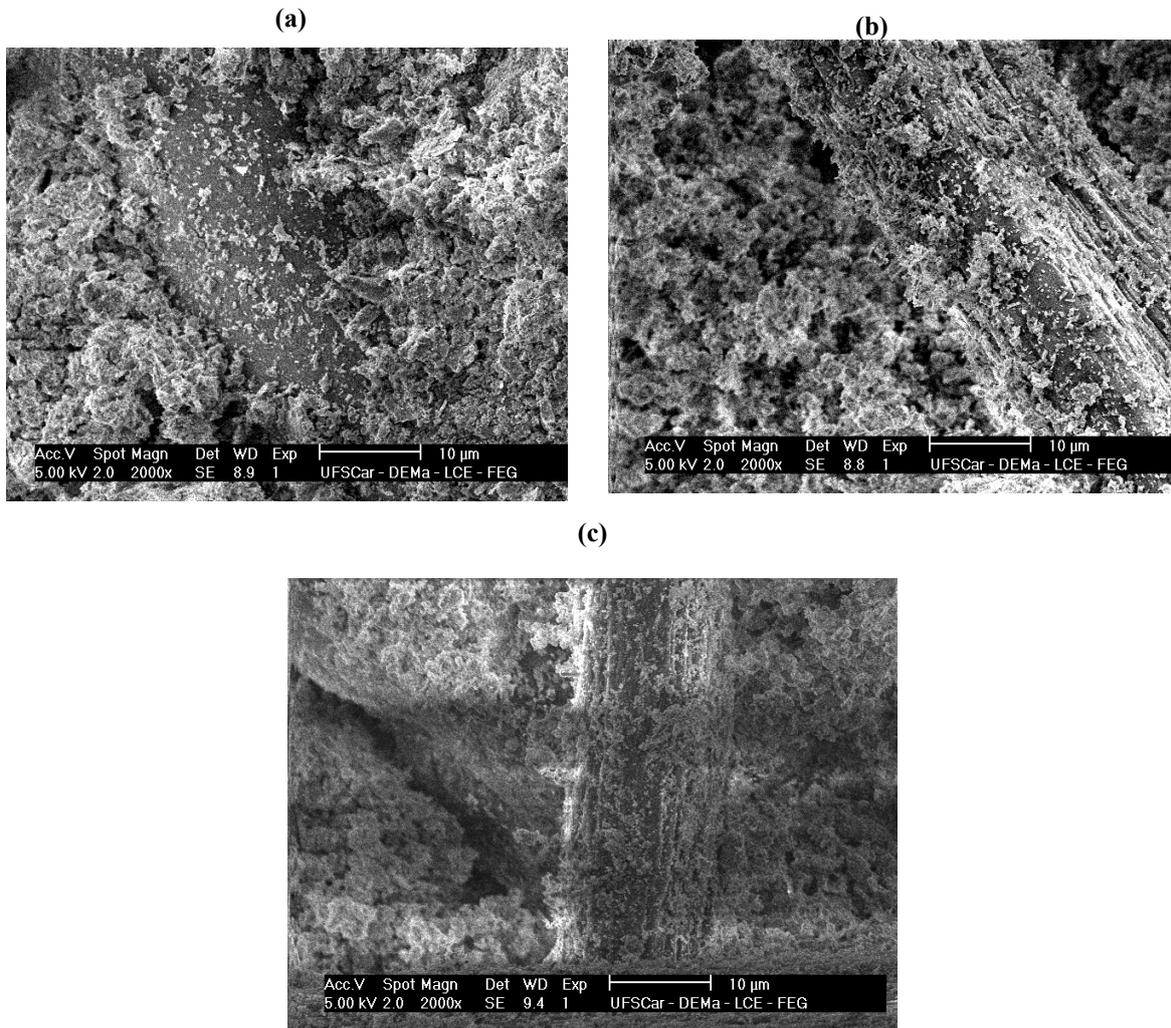


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.59 (b) pode-se constatar que, após 150 ciclos de filtração e limpeza similarmente aos 50 e 100 ciclos, grande parte das partículas concentraram-se nas camadas superficiais do tecido, tendendo a aumentar com o número de ciclos. Além disso, a aderência das partículas nas fibras do feltro de acrílico após a limpeza por pulso de ar reverso também foi observada. Na Figura 4.59 (c) observa-se um maior número de partículas nas fibras do filtro em relação às Figuras 4.59 (a) e 4.59 (b). Isto mostra a influência do acréscimo do número de ciclos, utilizando os mesmos parâmetros

operacionais, sobre o desgaste do filtro e o desempenho do equipamento na limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 4.59 - Fotografias da superfície do filtro de acrílico geradas no MEV, (a) após 100 ciclos, (b) após 150 ciclos e (c) após 200 ciclos de filtração e limpeza, com ampliação de 2.000x.

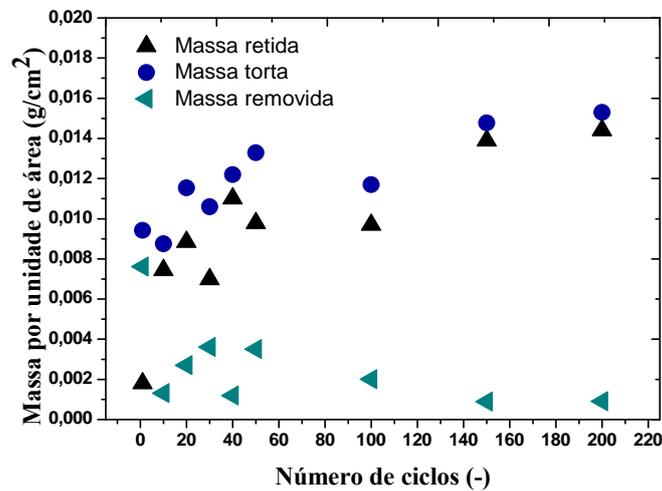


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

4.4.5. Análises dos filtros de acrílico após a filtração e limpeza por pulso de ar reverso

Para melhor análise do comportamento dos filtros após os 200 ciclos de filtração e limpeza a pulso de ar reverso, obtiveram-se a massa retida, a massa depositada (torta) e a massa desprendida por unidade de área do filtro. Na Figura 4.60 é apresentado o comportamento do número de ciclos em relação à massa retida, à massa depositada e à massa desprendida por ação da operação de limpeza.

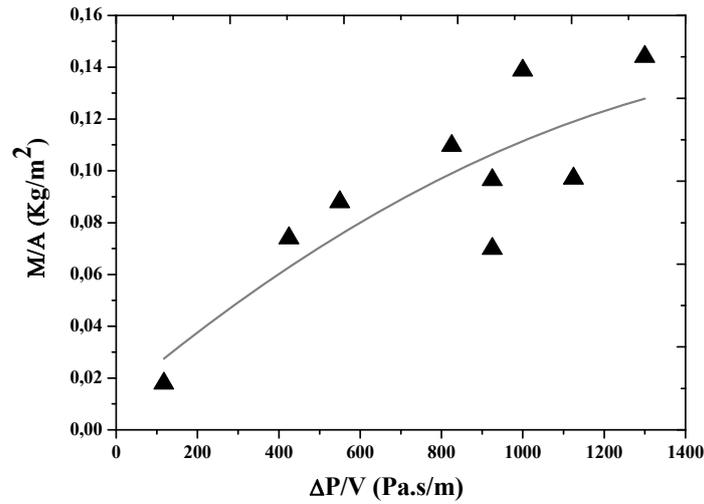
Figura 4.60 - Comportamento do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso na massa por unidade de área e na queda de pressão residual.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A relação entre a queda de pressão residual e a massa retida no filtro de acrílico, pode ser analisada na Figura 4.61. De forma que as curvas de cada ensaio apresentem uma tendência linear. Comportamento semelhante foi observado em 10 ciclos de filtração e limpeza no trabalho de RODRIGUES (2006), utilizando o equipamento de fluxo de ar reverso, nos tecidos de poliéster, acrílico e polipropileno, e como material particulado, a rocha fosfática e o polvilho.

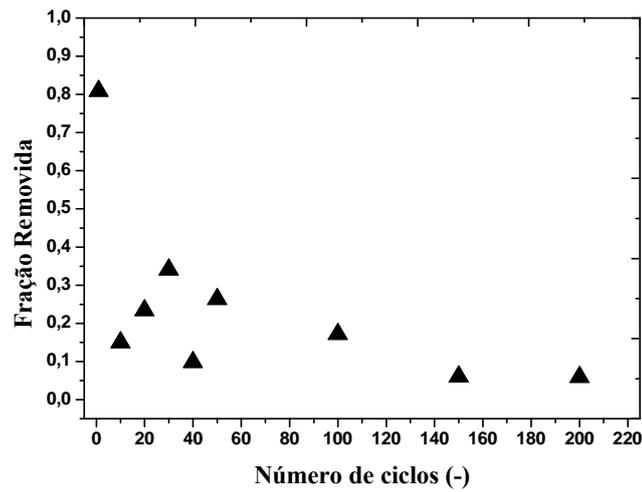
Figura 4.61 - Relação entre a queda de pressão residual e a massa retida para o acrílico e rocha fosfática.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Para melhor análise da operação de limpeza, apresentou-se a fração removida em função do número de ciclos, como mostrado na Figura 4.62. A Figura 4.62 garante a verificação da eficiência de limpeza por pulso de ar reverso, já que a velocidade de filtração utilizada foi constante.

Figura 4.62 - Fração removida em função do número de ciclos, no acrílico.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

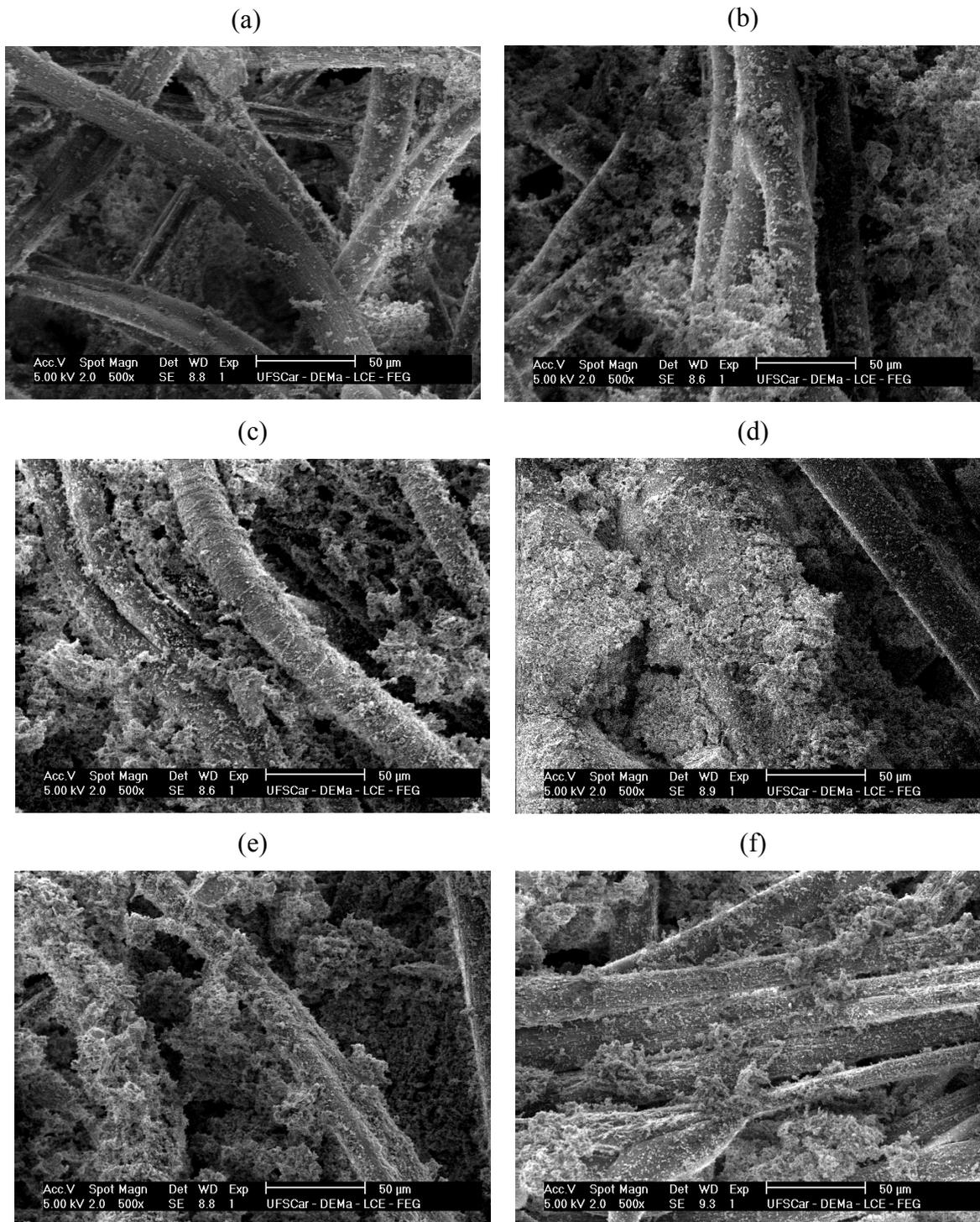
A partir da observação da Figura 4.62 pode-se constatar que a eficiência de limpeza não foi constante a cada ciclo. A maior eficiência de limpeza foi de 80% no primeiro ciclo de filtração e limpeza, valor este bem maior do que utilizando o polipropileno. Isto pode ser atribuído ao primeiro ciclo conter menor quantidade de material particulado na superfície, por ser a etapa característica da filtração de profundidade, em que a maior parte das partículas se deposita na filtração no interior do meio filtrante. Além disto, a menor eficiência de limpeza foi de aproximadamente 5%, referente ao 200º e último ciclo de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Portanto, pode-se dizer que a eficiência de limpeza tem influência direta da massa retida após a limpeza a cada ciclo de filtração e limpeza.

Na Figura 4.63 é mostrada a ocorrência de partículas nas camadas superficiais do feltro de acrílico, através de imagens obtidas pelo MEV, que correspondem aos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

Logo após cada ensaio de filtração e limpeza verificou-se o diâmetro médio das partículas retidas na superfície do acrílico e este não apresentou tendência de aumentar ou diminuir com o número de ciclos. O diâmetro médio das partículas foi de aproximadamente 3 μm . O mesmo diâmetro médio de partículas também foi apresentado pelo polipropileno.

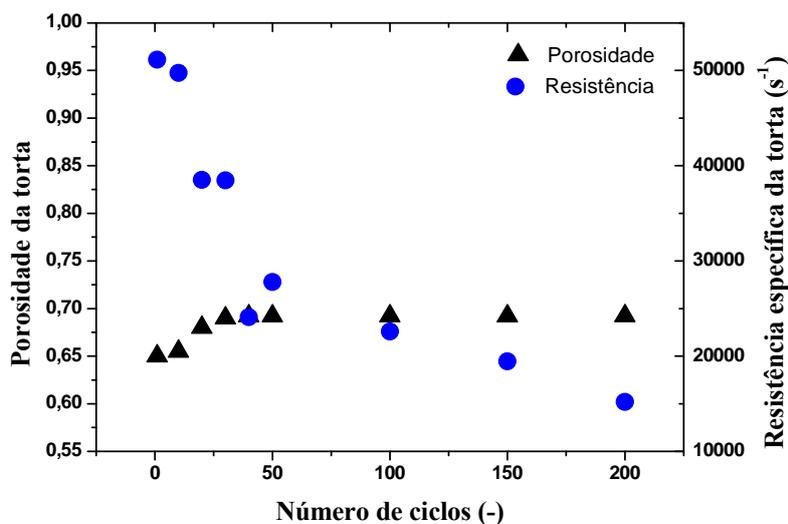
Considerando a seção linear das curvas de filtração, pode-se obter a resistência específica da torta de filtração em função do número de ciclos, como apresentado na Figura 4.64, e onde também pode ser observada a porosidade da torta de filtração. A resistência específica da torta foi calculada pelo arraste (S) em função da massa da torta por unidade de área (W), através do coeficiente angular da curva. A porosidade da torta foi calculada pela Equação de Ergun Modificada para cada ponto da curva de queda de pressão pelo tempo de filtração. Os dados utilizados nos cálculos estão na Tabela 4.2.

Figura 4.63 - Fotografias da superfície do feltro de acrílico geradas no MEV após os ciclos de filtração e limpeza em (a) 1 ciclo, (b) 10 ciclos, (c) 50 ciclos, (d) 100 ciclos, (e) 150 ciclos, e (f) 200 ciclos, com ampliação de 500x.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Figura 4.64 - Influência do número de ciclos na Resistência específica e na Porosidade da torta de filtração.

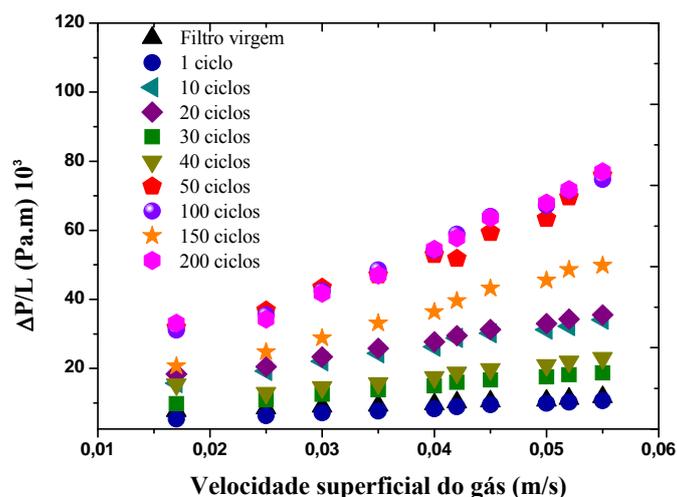


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.64 constatou-se a porosidade da torta aumentou e a resistência específica da torta diminuiu com o número de ciclos, semelhante ao ocorrido utilizando o polipropileno. Apesar disso, o acrílico apresentou uma tendência mais acentuada de diminuição da resistência específica da torta em função do número de ciclos. Este comportamento pode ser provocado pelo menor fechamento dos poros da superfície do tecido de acrílico, pois este apresentou menor quantidade de massa por unidade de área.

Outra constatação importante na avaliação do comportamento do tecido após a utilização refere-se à permeabilidade do meio filtrante. Admitindo a equação da permeabilidade Darciana, verificou-se que, com o aumento da velocidade superficial do gás, conseqüentemente ocorre o aumento da queda de pressão. Na Figura 4.65 são apresentados os valores de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás para o meio filtrante limpo (Ensaio 1), após 1 (Ensaio 2), 10 (Ensaio 3), 20 (Ensaio 4), 30 (Ensaio 5), 40 (Ensaio 6), 50 (Ensaio 7), 100 (Ensaio 8), 150 (Ensaio 9) e 200 (Ensaio 10) ciclos de filtração e limpeza.

Figura 4.65 - Curva para determinar a permeabilidade do meio filtrante acrílico.



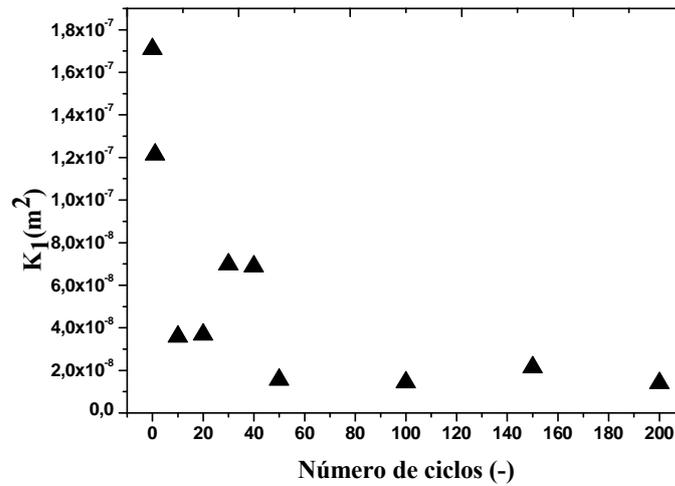
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Na Figura 4.65 pode-se constatar que, o aumento da velocidade superficial de filtração garantiu um acréscimo na queda de pressão utilizando o feltro acrílico. O mesmo comportamento foi observado utilizando o polipropileno. Estes resultados foram obtidos a partir de três experimentos de permeação para cada meio filtrante. No apêndice A estão inseridos os outros ensaios de permeação realizados neste estudo.

Pelo ajuste das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial no filtro, obteve-se a permeabilidade Darciana (K_1) em função do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, como mostrado na Figura 4.66.

Na Figura 4.66, observa-se que a permeabilidade Darciana (K_1) semelhante ao polipropileno, apresenta variações até o número de ciclos de 200 e tenderam a ficarem constantes. Este comportamento foi razoável, considerando que se utilizou velocidade baixa durante os ensaios experimentais (1,7 cm/s a 6 cm/s) e a queda de pressão de 200 Pa e não foi suficiente para causar total deformação nos meios filtrantes. Portanto, mesmo após 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso o feltro acrílico conservou uma boa qualidade na captura das partículas.

Figura 4.66 - Permeabilidade Darciana em função do número de ciclos de filtração e limpeza, no feltro acrílico.

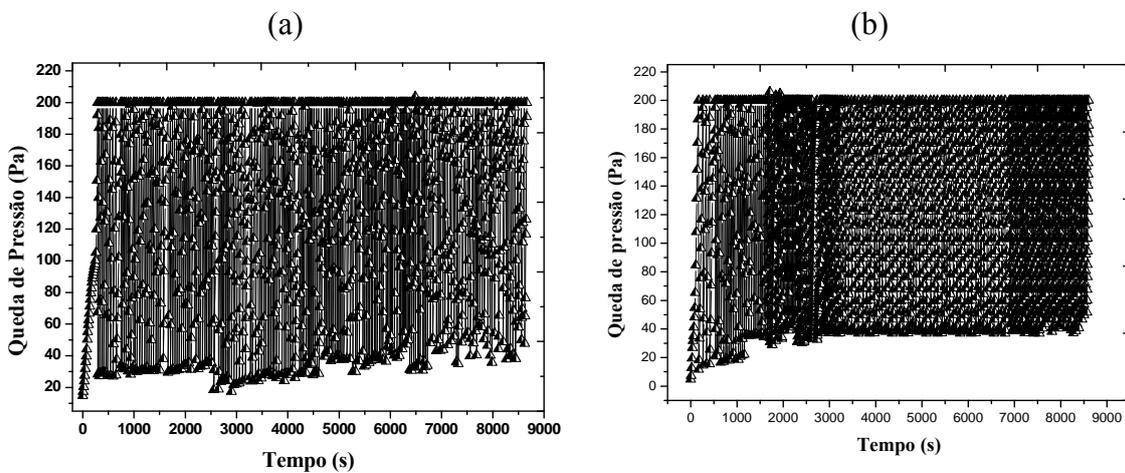


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

4.5. Comparações entre os meios filtrantes: Polipropileno e Acrílico

Uma comparação dos duzentos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso realizado nos dois tecidos analisados está apresentada na Figura 4.67, o que possibilita uma melhor observação dos resultados para as discussões mostradas até o momento.

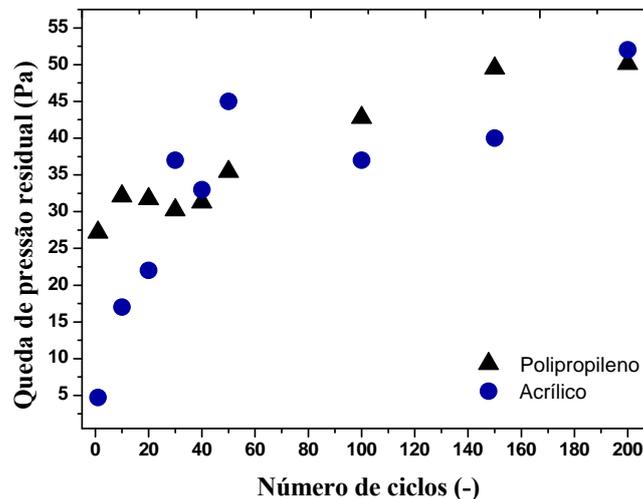
Figura 4.67 - Gráfico comparativo dos últimos ciclos em termos de queda de pressão e de tempo de filtração, para o tecido de (a) polipropileno e de (b) acrílico.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A partir da Figura 4.67, foi possível observar com mais clareza as pequenas diferenças entre as filtrações realizadas nos tecidos de polipropileno e de acrílico. O polipropileno, como comentado anteriormente, mostrou o maior período de filtração. Por isso, esta característica da filtração deve ser analisada juntamente com as demais, pois os dois tecidos apresentam algumas semelhanças na estrutura e no entrelaçamento das fibras. Do mesmo modo, verifica-se também a queda de pressão residual com o número de ciclos, cujos valores são próximos, mas diferentes, o que pode estar associado às pequenas variações no comportamento de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, como mostra a Figura 4.68.

Figura 4.68 - Queda de pressão residual em função do número de ciclos, nos tecidos de polipropileno e de acrílico.



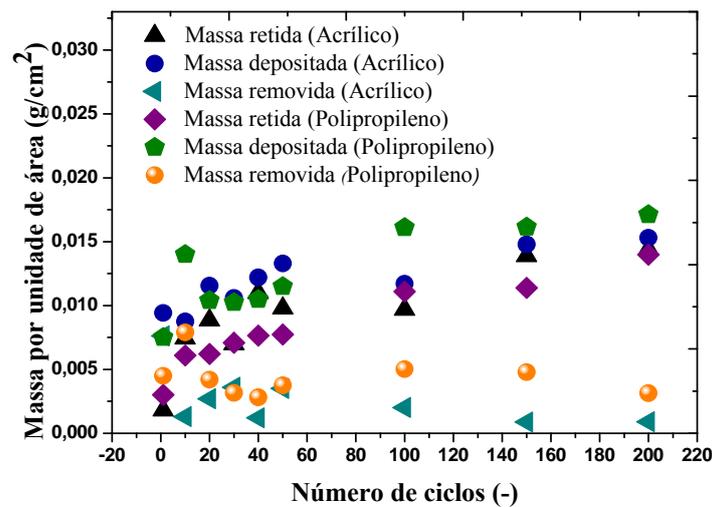
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Além de considerar os valores da queda de pressão residual sobre as curvas de filtração e limpeza, verificou-se que a massa retida, a massa depositada e a massa removida pela limpeza também influem na duração dos ciclos de filtração e limpeza e na durabilidade do meio filtrante, uma vez que estes valores se apresentam diferentes para cada meio filtrante analisados, como apresentado na Figura 4.69.

Na Figura 4.69 é apresentado como a diferença da massa depositada em cada tecido reflete nos valores de massa removida e retida após a limpeza por pulso de ar reverso nos ciclos de filtração e limpeza. Com o aumento do número de ciclos de filtração e limpeza, a massa retida apresenta uma tendência significativa de aumento nos dois tecidos analisados e ambos apresentam valores de massa retida próximos. Isto pode

ser atribuído à retenção das partículas nas fibras do filtro e à presença da saturação torta-tecido, já que estes meios filtrantes utilizados apresentam propriedades semelhantes. Para suprir totalmente a interação intermolecular torta-tecido, é preciso uma maior energia empregada na operação, que possa promover uma ruptura eficaz desta interação intermolecular e resultar em uma remoção total das partículas.

Figura 4.69 - Número de ciclos em função da massa por unidade de área, para o Polipropileno e o Acrílico.

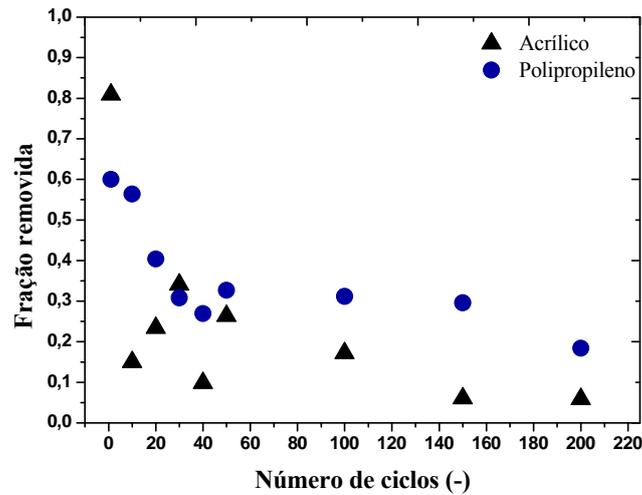


Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

A partir da Figura 4.69 pode-se dizer que o número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso interfere diretamente na massa por unidade de área da filtração e da limpeza. Do mesmo modo, a fração removida também sofre interferência com o número de ciclos. Na Figura 4.70 é mostrada a fração removida da torta em função do número de ciclos, no polipropileno e no acrílico.

Na Figura 4.70 pode-se constatar que a fração removida após 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso utilizando o tecido de polipropileno é maior que utilizando o tecido de acrílico, isto pode ser atribuído pela maior eficiência de limpeza do tecido de polipropileno após os 200 ciclos de filtração e limpeza. Desta forma, pode-se dizer que o tecido de polipropileno tem maior capacidade de remoção de partículas utilizando a operação de remoção por pulso de ar reverso.

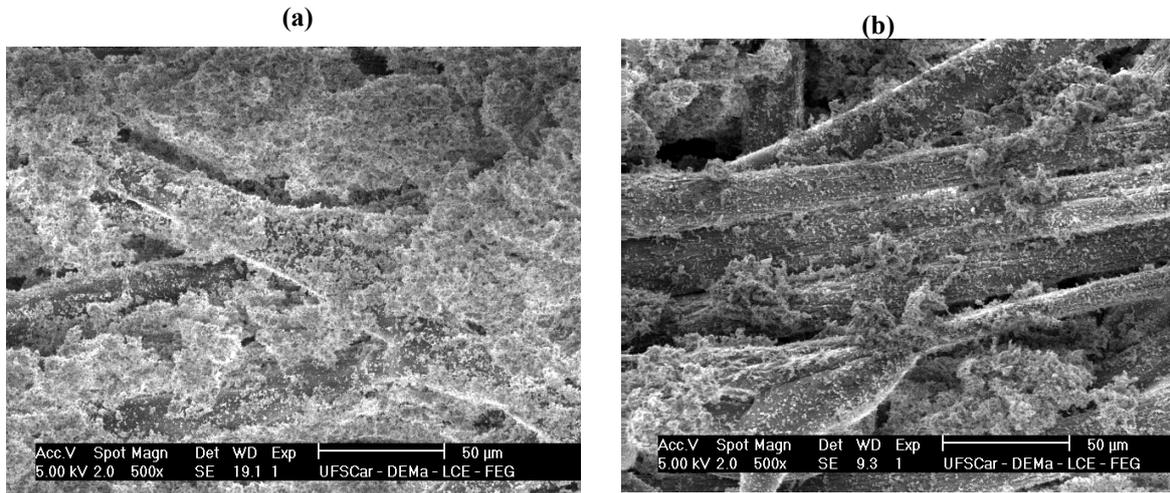
Figura 4.70 - Fração removida da torta com o número de ciclos, utilizando o tecido de Polipropileno e de Acrílico.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Outra constatação interessante refere-se ao aspecto do tecido após duzentos ciclos de filtração e limpeza. Na Figura 4.71 são apresentadas as superfícies dos tecidos analisados após duzentos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

Figura 4.71 - Fotografias das superfícies dos tecidos de (a) polipropileno e de (b) acrílico geradas no MEV após 200 ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, com ampliação de 500x.



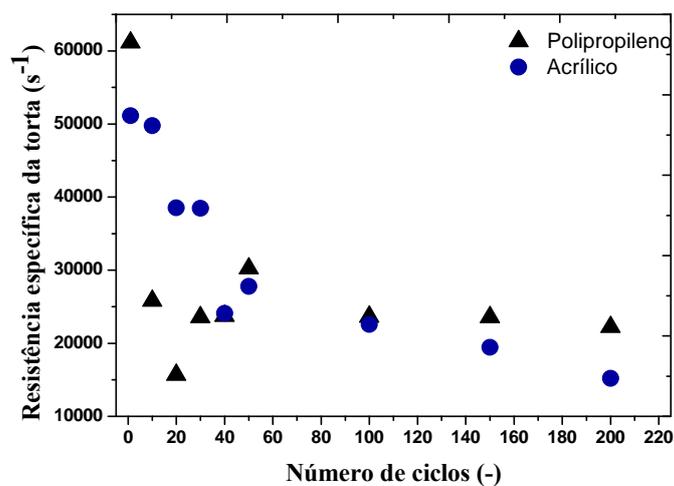
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Por meio da Figura 4.71 pode-se constatar que o tecido de polipropileno apresentou maior quantidade de partículas na superfície em relação ao tecido de acrílico, bem como a maior permanência das partículas de concentrado fosfático

preenchendo quase toda fibra do filtro. Assim, pode-se dizer que o tecido de polipropileno retém maior quantidade de partículas na superfície em relação ao tecido de acrílico. Comportamento similar foi observado por TANABE (2008) em que a menor profundidade de deposição das partículas de concentrado fosfático foi obtida para o tecido de polipropileno. Portanto, quando se desejar obter menores quantidades de material particulado retidas na superfície do meio filtrante, sugere-se a utilização do tecido de acrílico.

Além de se considerar a queda de pressão residual, a massa retida, a massa depositada, a massa removida e a fração removida, observou-se que a torta formada também é influenciada pelo número de ciclos, uma vez que a resistência específica da torta apresenta-se diferente para cada tecido analisado e varia de forma peculiar com os ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso, como pode ser observado na Figura 4.72.

Figura 4.72 - Curvas comparativas da resistência específica da torta para os dois tecidos.



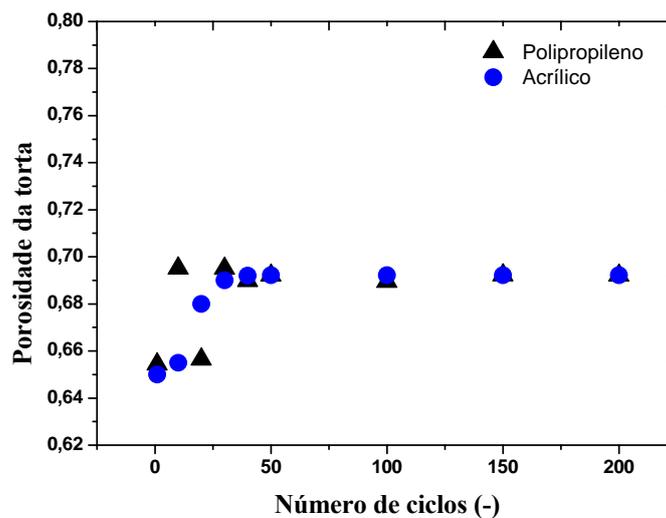
Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012..

Na Figura 4.72 constatou-se que a resistência específica da torta tendeu a diminuir com o número de ciclos utilizando como meio filtrante polipropileno e acrílico. A resistência específica da torta após 100 ciclos de filtração e limpeza no tecido de polipropileno também tendeu a permanecer constante. Ainda de acordo com esta figura, após os duzentos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso observou-se que o tecido de polipropileno apresentou maior resistência específica da torta em relação ao tecido de acrílico. SALEEM *et al.* (2012) constataram que a

resistência específica da torta é proporcional a velocidade e diminuiu com o aumento da queda de pressão residual.

Assim como a resistência específica da torta, a porosidade da torta também foi influenciada pelo acréscimo no número de ciclos de filtração e limpeza, para ambos os meios filtrantes utilizados, como mostra a Figura 4.73.

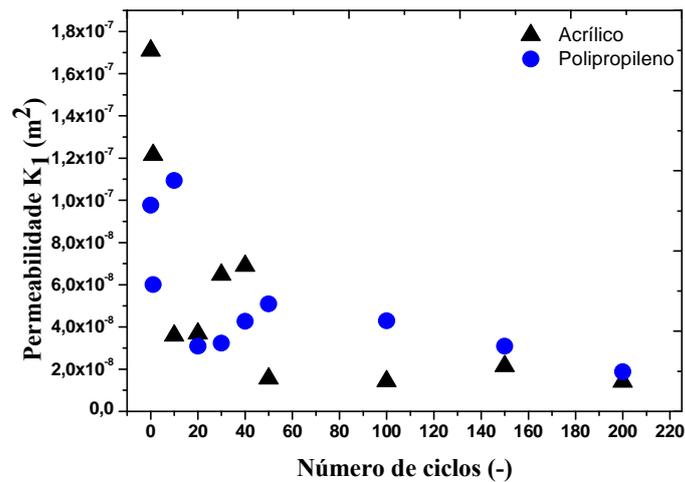
Figura 4.73 – Porosidade da torta de filtração em função do número de ciclos para o tecido de polipropileno e acrílico.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012..

Além disto, a permeabilidade dos meio filtrantes também foi diferente sem a utilização do filtro (filtro virgem) e após duzentos ciclos de filtração e limpeza, como apresentado na Figura 4.74, onde é mostrada a tendência decrescente da permeabilidade dos dois tecidos analisados com o número de ciclos de filtração e limpeza. O tecido de polipropileno apresenta um pouco mais permeável após duzentos ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso em relação ao tecido de acrílico, utilizando os mesmos parâmetros operacionais.

Figura 4.74 - Permeabilidade dos meios filtrantes com o número de ciclos.



Fonte: ACERVO PESSOAL, 2012.

Com estes resultados, pode-se concluir que o tecido de polipropileno apresentou maior permeação, maior resistência específica da torta, maior quantidade de massa retida após a limpeza e maior eficiência de limpeza em relação ao tecido de acrílico.

A partir destes resultados, pode-se concluir que o tecido de polipropileno exibiu maior número de partículas retidas na sua superfície após a limpeza por pulso de ar reverso, como pode ser visualizado na Figura 4.71. Isto pode ser ocorrência da maior força de adesão entre partícula-tecido, o que dificultou na maior remoção das tortas de filtração. Já no tecido de acrílico as partículas podem ter sido retidas em maior quantidade no interior do filtro, devido ao fato deste possuir maior abertura na superfície, capacitando facilmente a uma filtração de profundidade (TANABE *et al*, 2011).

Portanto, o que se observou para os experimentos com concentrado fosfático, a uma queda de pressão de 200 Pa, à velocidade de filtração de 4 cm/s, à pressão de pulso de 4 bar e a um tempo de pulso de 200 ms, foi que, aparentemente os tecidos de polipropileno e de acrílico, apesar das suas diferenciações, mostraram-se adequados como meios filtrantes nas operações de filtração e limpeza por pulso de ar reverso.

RODRIGUES (2006) também constatou que o tecido de polipropileno teve maior queda de pressão residual utilizando a limpeza por fluxo de ar reverso, quando comparado ao tecido de acrílico. E a resistência específica da torta também variou para cada tecido. O autor atribuiu à saturação do tecido um processo que ocorreu mais na

superfície do tecido (provavelmente referenciando a torta), que no interior do tecido, devido ao comportamento do número de partículas retidas por ciclo, sugerindo assim que a penetração seja um fenômeno que se define no primeiro ciclo.

DITTLER e UMHAUER (2001) observaram que o tamanho das partículas quase independe das condições de regeneração do meio filtrante e do número de ciclos. Os autores verificaram o aumento da queda de pressão residual com o número de ciclos, e o decréscimo do tempo de operação de filtração com o número de ciclos. Estes concluíram que a diminuição do tempo de filtração está diretamente ligada à eficiência de regeneração do meio filtrante e a avaliação do comportamento do filtro após a operação de filtração e limpeza corresponde à queda de pressão residual, o tempo de filtração e a eficiência de regeneração.

CALLÉ *et al.* (2002) verificaram que após a operação de filtração e limpeza, a quantidade de partículas removidas tornou-se evidente com o aumento da queda de pressão residual e a diminuição da eficiência de filtração com o progresso dos ciclos. Neste estudo concluíram que o tratamento da superfície do filtro com o recobrimento da superfície do filtro com uma camada fina e rígida, promove o desprendimento da torta e evita grande quantidades de partículas acumuladas nos ciclos iniciais.

5. CONCLUSÕES

Avaliando-se que atualmente existem trabalhos cada vez mais direcionados para evitar ao máximo a poluição atmosférica, esta dissertação de mestrado buscou contribuir com o estudo do desempenho do equipamento de filtração e limpeza por pulso de ar reverso com a finalidade de conhecer as modificações dos filtros de tecido polipropileno e acrílico durante a etapa de regeneração, tentando assim aumentar a vida útil dos filtros de tecido.

Primeiramente, observaram-se os melhores parâmetros operacionais de queda de pressão máxima, de tempo de pulso e de velocidade de filtração para executar os primeiros ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Os resultados mostraram que o menor tempo de pulso utilizado apresentou a maior queda de pressão residual, maior massa residual e um menor desgaste do meio filtrante. Já com o aumento da queda de pressão máxima, constatou-se que houve o aumento da massa retida, devido ao preenchimento do meio filtrante. Logo com o aumento da velocidade de filtração, interferiu-se diretamente no aumento da queda de pressão durante a filtração, na diminuição do tempo de filtração, no decréscimo da massa da torta de filtração e na massa retida após a limpeza, e no decréscimo da resistência específica da torta. Assim, estes resultados demonstraram que utilizando a maior velocidade de filtração observou-se menor quantidade de partículas retidas superfície do meio filtrante.

Posteriormente, investigou-se a influência do acréscimo do número de ciclos de filtração e limpeza por pulso de ar reverso fixando os parâmetros operacionais: o tempo de pulso em 200 ms para evitar maior desgaste do meio filtrante e grande consumo de energia durante o pulso; a queda de pressão máxima em 200 Pa a permitir massa retida considerável e manter uma boa eficiência de coleta; a velocidade de filtração em 4 cm/s por não ocasionar uma operação lenta ou acelerada demais e contribuir em um valor baixo e significativo de massa retida após a limpeza como tentativa de manter a eficiência de coleta do meio filtrante. Assim sendo, estes parâmetros apresentaram adequados no desempenho do equipamento de pulso de ar reverso.

A utilização dos meios filtrantes, polipropileno e acrílico, foram satisfatórias para o desempenho dos ciclos de filtração e limpeza apesar das heterogeneidades das fibras destes, que contribuíram para as diferenças entre as filtrações, como o período de filtração. Deste modo, verificou-se uma tendência de aumento da queda de pressão residual com o número de ciclos para o acrílico e o polipropileno, e os valores mostraram-se próximos apesar de diferentes, assim como a massa retida após duzentos ciclos de filtração e limpeza.

Com as imagens geradas no MEV da superfície dos meios filtrantes após os duzentos ciclos de filtração e limpeza possibilitaram a observação que o feltro de acrílico apresentou menor quantidade de partículas retidas após a limpeza em relação ao feltro de polipropileno. Portanto, pode-se dizer que o polipropileno possivelmente garantiu maior eficiência de coleta durante a filtração devido à maior resistência específica da torta e a maior permeabilidade deste meio filtrante.

6. PROPOSTAS FUTURAS

Os resultados apresentados nesta dissertação de mestrado deram procedência a alguns caminhos promissores que possibilitam avaliar ainda mais o desempenho do equipamento de filtração e limpeza por pulso de ar reverso. Para trabalhos futuros, resumidamente, sugere-se o aprofundamento deste trabalho, como especificado a seguir:

- Investigar o efeito da grande variação nas condições operacionais, tais como a utilização de outros tecidos filtrantes, maior número de ciclos de filtração e limpeza e diferentes valores de velocidades de filtração, queda de pressão e tempo de pulso;
- Determinar a porosidade da torta de filtração pelo método direto através de microfotografias no MEV analisadas pelo programa Image Pro Plus 7.0 após as etapas de preparação (pré-endurecimento do tecido, embutimento, seccionamento, esmerilhamento e polimento);
- Verificar a influência da velocidade de filtração no desgaste do meio filtrante submetido a mais de duzentos ciclos de filtração e limpeza;
- Determinar a eficiência de filtração dos experimentos desenvolvidos e sua associação com os mecanismos de coleta do material particulado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT. Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos técnicos, 2012. Disponível em: <http://www.abint.org.br/>. (última verificação 02 -08-2012).

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

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

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

ALLEN, R. W. K.; GOYDER, H. G. D.; MORRIS, K. Modelling media movement during cleaning of pulse jet fabric filters. **Trans IChemE**, v.77, part A, 1999.

AZEVEDO, S. G. R. **Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2009.

BARROS, P. M. **Estudo da força de adesão de tortas de filtração de gases em diferentes condições operacionais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2010.

BERBNER, S.; PILZ, T. Characterization of the filtration and regeneration behaviour of rigid ceramic barrier filters at high temperatures. **Powder Technology**, v.86, p.103–111, 1996.

BENTO, M. H. S.; BARRETO, P. L.; GODOY, L. P.; SCHMIDT, A. S. Efeitos da poluição do ar causada por veículos automotores na saúde humana e no meio ambiente. **Revista de Engenharia e Tecnologia**. V.4, nº 3, p. 19-34, 2012.

BINNIG, J; MEYER, J; KASPER, G. Origin and mechanisms of dust emission from pulse-jet cleaned filter media. **Powder Technology**, v.189, p.108–114, 2009.

BOTARI, A.; BERNARDO, L. D.; Modeling of the head loss in up flow coarse sand and gravel direct filtration. **Eng Sanit Ambient**, v.14, n.2, p.245-256, 2009.

BRAGA, C. F.; TEIXEIRA, E. C. Estudo de aerossóis atmosféricos e aplicação de modelos numéricos. **Química Nova**, v. 27, nº 4, p. 567-573, 2004.

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

CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D.; Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. **Powder Technology**, v.128, p. 213-217, 2002.

CANÇADO, J. E. D.; BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; ARBEX, M. A.; SALDIVA, P. H. N.; SANTOS, U. P. Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. **J Bras Pneumol.**, v.32, p.S5-S11, 2006.

CARNEIRO, L. G. **Contribuição ao estudo da qualidade do ar *indoor*: avaliação da concentração de radônio, metais e bioaerossóis no ar em museus e galerias.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2012. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/>. (última verificação 20-08-2012).

CERON, L. P. **Desenvolvimento de filtro cartucho de polimida para altas temperaturas com resina epóxi dgeba e novo agente de cura.** Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CHOI, K-J. Morfologia e eficiência de filtragem de ar por materiais não trançados carregados. **Revista da Sociedade Brasileira de Controle e Contaminação.** p. SBCC 40-42, 2008.

CHI, H.; YU, L.; CHOI, J-H.; JI, Z. Optimization of Nozzle Design for Pulse Cleaning of Cleaning of Ceramic Filter. **Chinese Journal Of Chemical Engineering**, v. 16, p. 306-313, 2008.

CHOUDHARY, A.K.; DWIVEDI, R. To study of punch density, pulse pressure and face velocity on pulse jet filtration performance. **11th World Filtration Congress**, Graz-Austria, 2012.

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

DONOVAN, R. P. **Fabric filtration for combustion sources.** Fundamental and basic technology. New York: Dekker, 1985.

DITTLER, A.; UMHAUER, H. F. The influence of conditioning and regeneration on the separation behaviour of rigid surface filters for the separation of particles from gases. **Powder Technology**, v.120, p. 223-231, 2001.

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

ELLENBECKER, M.J.; LEITH, D. Dust Removal Characteristics of Fabrics Used in Pulse-Jet Filters. **Powder Technology**, v.36, p. 13-19, 1983.

FARGNOLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido**. Dissertação de Mestrado. Universidade federal de São carlos, São Carlos-SP, 2010.

GINESTET, A.; PUGNET, D. Measurement of the particle emission of an industrial pulse-jet fabric following filters cleaning. **11th World Filtration Congress**, Graz-Austria, 2012.

GINO CACCIARI. Empresa Gino Ciacciari. Disponível em: <http://www.ginocacciari.com.br/pagina_inicial.htm>. Acesso em: Agosto de 2011.

HABERMANN, M.; GOUVEIA, N. Tráfego veicular e mortalidade por doenças do aparelho circulatório em homens adultos. **Revista Saúde Pública**. V. 46. p. 26-33, 2012.

HATA, M.; FURUUCHI, M. ; KANAOKA, C.; INAGAKI, T. Analysis of Pulse-jet Cleaning of Dust Cake from Ceramic Filter Element. **Nacional Technical Information Service**, 2004.

HINDS, W. C. **Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of airborne particles**. 2.ed., p.192-195, 1998.

HINDY, K. T. Influence of selected fixed parameters on Pulse-Jet fabric filter operation. **Atmospheric Environment**, v.20, p. 1517-1521, 1986.

HINDY, K. T.; SIEVERT, J.; LOFFLER, F. Influence of cloth structure on operational characteristics of pulse-jet cleaned filter bags. **Pergamon Journals Ltd Environment International**, v.13, p.175-181, 1987.

IINOYA, K.; DENNIS, R. Industrial gas filtration. In MATTESON, M. J.; ORR, C. **Filtration: principles and practices**. 2^aed, New York: Dekker. p. 201-248, 1987.

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

JI, Z.; SHI, M.; DING, F. Transient flow analysis of pulse-jet generating system in ceramic filter. **Powder Technology**, v.139, p.200-207, 2004.

JU, J.; CHIU, M-S.; TIEN, C. Further work on pulse-jet fabric filtration modeling. **Powder Technology**, v.118, p.79-89, 2001.

KANAOKA, C.; AMORNKITBAMRUNG, M. Effect of filter permeability on the release of capture dust from a rigid ceramic filter surface. **Powder Technology**, v.118, p.113-120, 2001.

KAVOURAS, A.; KRAMMER, G. A model analysis on the reasons for unstable operation of jet-pulse filters. **Powder Technology**, v.154, p.24-32, 2005.

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

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

LO, L.; CHEN, D. PUI, D. Y. H. Experimental study of pleated fabric cartridges in a pulse-jet cleaned dust collector. **Powder Technology**, v.197, p.141-149, 2010.

LORA, E. E. S. Prevenção e controle de poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte. 2ªEdição- Rio de Janeiro: **Interciência**, 2002.

LUPION, M.; GALAN, M. R.; FARINAS, B. A.; NAVARRETE, B. Parameters affecting the dust cake formation in filtering elements at high temperature. **11th World Filtration Congress**, Graz-Austria, 2012.

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

MARTINS, P.; VALENTE, J.; PAPOILA, A. L.; CAIRES, I.; MARTINS, J. A.; MATA, P.; LOPES, M.; TORRES, S.; PINTO, J.R.; BORREGO, C.; NEUPARTH, N. Efeito conjunto da exposição à poluição do ar e aos ácaros do pó as vias aéreas. **Revista Portuguesa Imunoalergologia**. V.20, p. 47-57, 2012.

MATESON, M. J. ; ORR, C. Filtration: principles and practices. 2ª ed. **Editores Dekker**, New York, 1987.

MUKHOPADHYAY, A; DHAWAN, K. An L9 orthogonal design methodology to study the impact of operating parameters on particulate emission and related characteristics during pulse-jet filtration process. **Powder Technology**, v.195, p. 128-134, 2009.

NUNES, D. M. **Construção de um sistema de filtração de gases para o estudo da formação e remoção de tortas de filtração**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2011.

OSÓRIO, V. M. **Comportamento da filtração de gases em meios filtrantes de celulose**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2006.

PARK, H. S.; LIM, K. S. Dust emission characteristics of pulse jet bag filters. **Filtech**, p. II 55 – 60, 2009.

PARK, B. H.; KIM, S. B.; JO, Y. M.; LEE, M-H. Filtration Characteristics of Fine Particulate Matters in a PTFE/Glass Composite Bag Filter. **Aerosol and Air Quality Research**, v.12, p. 1030-1036, 2012.

POWER, J. Surface filtration: the way forward? **Filtration and Separation**, mar, p. 134-136, 1998.

RIBEIRO, A.; FERNANDES, R. **Mitos e verdades na Filtração**, 2005. Disponível em: <http://www.cunalatina.com.br>. (último acesso 5-10-2011).

ROCHA, S.M.S. **Estudo da Influência da Velocidade e dos Ciclos de Filtração na Formação da Torta na Limpeza de Gases em Filtro de Mangas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2010.

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

RODRIGUES, M. V. **Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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

SCHILDERMANS, I.; BAEYENS, J. Pulsejet cleaning of rigid sintered metal fibre filters in gas filtration. **Filtech**, p. 244-252, 2005.

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

SALEEM, M.; KHAN, R. U.; TAHIR, M. S.; KRAMMER, G. Experimental study of cake formation on heat treated and membrane coated needle felts in a pilot scale pulse jet bag filter using optical in-situ cake height measurement. **Powder Technology**, v.214, p. 388-399, 2011.

SALEEM, M.; KRAMMER, G.; TAHIR, M. S. The effect of operating conditions on resistance parameters of filter media and limestone dust cake for uniformly loaded needle felts in a pilot scale test facility at ambient conditions. **Powder Technology**, v.228, p. 100-107, 2012.

SITAPE. Empresa de Engenharia do Ambiente. Disponível em: <<http://www.sitape.pt/Empresa.asp>> . Acesso em 29 de fevereiro de 2013.

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

SIMON, X; CHAZELET, S; THOMAS, D; BÉMER, D; RÉGNIER, R. Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings. **Powder Technology** v.172, p.67-81, 2007.

SIMON, X.; BÉMER, D.; CHAZELET, S.; THOMAS, D.; RÉGNIER, R. Consequences of high transitory airflows generated by segmented pulse-jet cleaning of dust collector filter bags. **Powder Technology** v.201, p.37-48, 2010.

SOUZA, F. M. N.; SILVA, C. E.; AGUIAR, L. A. Análise de riscos como instrumento para sistemas de gestão ambiental. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.3, nº1, p. 18-41, Aquidabã, 2012.

SUH, J.; LIM, Y.; ZHU, J. Influence of pulsing-air injection on pressure drop in a coke dust bagfilter. **Korean J. Chem. Eng.**, v.28, p. 613-619, 2011.

TANABE, E. H. **Estudo do comportamento da deposição das partículas de diferentes meios filtrantes**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2008.

TANABE, E.H. **Desempenho dos meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2011.

TANABE, E. H.; BARROS, P. M.; RODRIGUES, K. B.; AGUIAR, M. L. Experimental investigation of deposition and removal of particles during gas filtration with various fabric filters. **Separation and Purification Technology**, v.80, p.187-195, 2011.

THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. Air pollution control equipment – particulates, v.1, **CRC Press**, Flórida, 1988.

THEODORE, L. **Air pollution control equipment calculations**. Cap. 12, p. 503-513, 2008.

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

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

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T.; SCURRAH, K. L.; GRAEF, A. The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance. **Journal of Aerosol Science**, v. 27, nº1, p. 617-618, 1996.

WALSH, D. C.; STENHOUSE, J. I. T. The effect of particle charge and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. **Journal of Aerosol Science**, v. 28, nº 2, p. 783-799, 1997.

APÉNDICE A

A. DADOS OBTIDOS NOS TESTES DE PERMEABILIDADE NO POLIPROPILENO E NO ACRÍLICO

Tabela A 1 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido virgem Acrílico.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	20,02	21,18	16,14
2,5	23,87	21,88	17,89
3,0	24,97	22,93	19,24
3,5	25,47	23,48	20,26
4,0	26,77	24,33	21,55
4,2	28,35	25,15	22,7
4,5	29,04	26,16	23,51
5,0	29,65	27,03	23,91
5,2	31,03	28,19	24,75
5,5	32,97	29,32	25,83

Tabela A 2 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 1 ciclo de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	13,58	13,18	13,59
2,5	16,17	15,44	15,89
3	17,94	16,93	18,59
3,5	19,55	18,52	19,68
4	20,89	20,44	21,07
4,2	21,86	21,92	22,84
4,5	23,86	23,44	23,9
5	24,94	24,43	25,25
5,2	25,76	25,82	25,98
5,5	27,05	26,44	26,89

Tabela A 3 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 10 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	43,84	35,44	38,42
2,5	53,77	43,55	47,45
3	60,72	51,16	53,88
3,5	65,59	56,54	60,94
4	69,05	61,89	66,52
4,2	75,26	68,28	72,14
4,5	78,03	71,82	76,65
5	78,23	75,94	80,17
5,2	79,34	80,54	81,35
5,5	85,55	83,86	86,25

Tabela A 4 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 20 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	45,37	47,02	47,7
2,5	55,64	48,86	49,38
3	63,71	55,85	55,98
3,5	68,81	62,65	61,99
4	72,32	68,05	67,23
4,2	76,36	72,24	72,72
4,5	79,44	77,44	77,63
5	83,07	81,88	82,46
5,2	85,22	85,73	86,54
5,5	87,27	89,51	89,61

Tabela A 5 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 30 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	24,58	24,3	24,74
2,5	28,87	26,29	26,31
3	33,18	29,84	31,02
3,5	36,41	33,41	33,87
4	37,97	37,82	37,00
4,2	40,14	40,25	39,74
4,5	42,15	41,07	41,9
5	43,48	44,3	43,87
5,2	45,12	45,93	45,77
5,5	46,82	46,99	46,79

Tabela A 6 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 40 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	38,35	38,7	38,22
2,5	47,15	49,87	48,50
3	55,15	54,03	54,90
3,5	59,53	58,44	58,78
4	65,73	65,62	65,66
4,2	71,05	69,99	70,83
4,5	75,45	73,39	73,46
5	79,63	77,63	77,66
5,2	82,29	82,61	82,59
5,5	86,29	86,14	86,37

Tabela A 7 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 50 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	62,56	87,96	87,91
2,5	81,44	100,24	94,66
3	95,59	115,07	115,08
3,5	97,6	127,82	126,85
4	118,16	139,35	139,36
4,2	80,77	155,44	152,07
4,5	107,79	171,72	165,04
5	126,18	176,77	171,43
5,2	153,43	183,72	184,73
5,5	186,75	187,03	195,15

Tabela A 8 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 100 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	71,91	79,27	82,098
2,5	93,19	87,24	85,52
3	108,11	104,15	105,47
3,5	125,41	121,21	117,18
4	140,27	133,56	132,38
4,2	150,62	145,72	145,78
4,5	164,44	157,07	158,42
5	167,44	167,07	169,68
5,2	178,15	178,67	179,17
5,5	184,25	184,12	192,11

Tabela A 9 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 150 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	49,55	54,76	51,17
2,5	63,24	59,96	63,08
3	74,78	72,22	69,24
3,5	83,54	80,46	84,49
4	92,35	90,92	89,57
4,2	99,79	99,98	97,43
4,5	109,49	106,54	107,72
5	116,33	112,49	112,18
5,2	124,206	118,64	121,92
5,5	124,67	125,83	123,11

Tabela A 10 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Acrílico após 200 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	82,09	83,25	83,01
2,5	85,53	86,20	84,59
3	106,02	103,61	101,23
3,5	117,18	118,73	118,21
4	132,38	140,81	136,78
4,2	145,78	143,92	142,65
4,5	158,42	160,76	159,05
5	169,67	170,74	170,23
5,2	179,17	180,32	180,16
5,5	192,11	193,12	193,20

Tabela A 11 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido virgem Polipropileno.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	14,27	14,007	13,53
2,5	15,76	15,65	14,99
3	18,37	18,62	17,95
3,5	20,42	20,75	20,54
4	21,66	22,59	23,25
4,2	24,21	24	24,19
4,5	26,13	25,39	25,29
5	26,73	27,98	27,29
5,2	28,46	28,99	27,88
5,5	29,08	32,86	28,83

Tabela A 12 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 1 ciclo de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	20,93	21,72	20,48
2,5	27,21	22,5	24,00
3	30,03	27,34	26,89
3,5	33,47	31,03	31,76
4	36,37	33,59	35,56
4,2	38,65	36,64	37,12
4,5	41,67	40,99	39,84
5	44,08	41,87	42,33
5,2	45,46	44,23	44,49
5,5	46,64	52,13	45,45

Tabela A 13 – Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 10 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	30,2	31	31,12
2,5	32,2	31,54	33
3	34,5	32	34,2
3,5	36,13	33,02	34
4	37	34,00	35,6
4,2	40,02	36,7	37,2
4,5	41,5	39,9	41,1
5	42,3	41,87	41,93
5,2	43,5	43,23	43
5,5	44,8	45	45,14

Tabela A 14 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 20 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	41,24	41,3	41
2,5	44,16	42,39	43,7
3	52,05	50,65	51
3,5	59,44	57,71	58,23
4	66,38	63,81	64
4,2	74,24	71,15	71,5
4,5	78,37	77,95	77,98
5	83,77	79,52	80,34
5,2	88,12	86,2	86,3
5,5	88,33	88,97	88,4

Tabela A 15 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 30 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	42,77	39,64	40
2,5	43,55	49,55	45
3	52,07	54,23	54,3
3,5	57,78	58,61	57,34
4	66,29	62,45	65,9
4,2	72,04	70,65	70,47
4,5	77,49	79,53	79
5	81,67	81,9	81,3
5,2	87,07	85,89	88,03
5,5	88,25	87,58	88,34

Tabela A 16 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 40 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	56,48	52,65	53
2,5	58,72	62,94	60,23
3	69,78	73,55	72,35
3,5	79,24	81,12	80,29
4	89,14	86,704	87,0
4,2	99,69	98,35	99,35
4,5	104,025	105,37	104,98
5	110,71	117,77	115,32
5,2	114,19	118,77	116
5,5	131,39	120,56	129,67

Tabela A 17 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 50 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	30,2	30,87	31,23
2,5	32,21	33,66	32
3	37	36,78	36,62
3,5	40,58	42,38	41
4	46,63	47,59	47,34
4,2	49,82	49,99	49
4,5	52,2	51,14	51
5	55,22	52,84	53
5,2	57,42	58,24	57,45
5,5	59,28	65,31	64,2

Tabela A 18 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 100 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	37,36	50	39
2,5	44,15	53	51,2
3	50,42	57	55,54
3,5	53,54	60	56
4	58,56	62,5	60,2
4,2	65,41	66,4	64,98
4,5	68,52	69	68,2
5	73,75	72,8	72,1
5,2	76,81	76,78	76,8
5,5	79,37	86,59	84,2

Tabela A 19 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 150 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	44,95	42,93	44,23
2,5	46,09	49,36	47,6
3	56,24	54,52	55,2
3,5	61,15	60,43	60
4	72,64	69,53	72
4,2	74,33	75,12	74,7
4,5	77,44	81,15	80,89
5	81,98	84,11	83,23
5,2	87,103	90,89	89,2
5,5	100,65	91,14	100,4

Tabela A 20 - Dados utilizados na obtenção da permeabilidade do tecido Polipropileno após 200 ciclos de filtração e limpeza.

Vf (cm/s)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)	ΔP (Pa)
1,7	64,65	66,89	65
2,5	83,55	69,89	70,34
3	94,23	88,43	92,4
3,5	100,57	99,96	99,89
4	106,02	106,26	105,92
4,2	115,27	115,3	115,45
4,5	121,97	128	127,3
5	136,21	138,84	136,56
5,2	143,97	142,3	143,86
5,5	144,79	160,49	156,76