



**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 TRATAMENTOS DAS
SUPERFÍCIES DOS MEIOS FILTRANTES SUBMETIDOS À
FILTRAÇÃO POR PULSO DE AR REVERSO**

**São Carlos - SP
2017**

SAMIRYS SARA RODRIGUES CIRQUEIRA

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS TRATAMENTOS DAS
SUPERFÍCIES DOS MEIOS FILTRANTES SUBMETIDOS À
FILTRAÇÃO POR PULSO DE AR REVERSO**

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

Orientadora: Prof^ª Dr^ª Mônica Lopes Aguiar

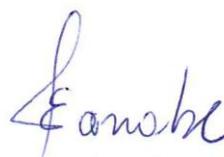
Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe

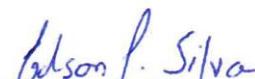
**São Carlos - SP
2017**

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE TESE DE SAMIRYS SARA RODRIGUES CIRQUEIRA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 31 DE MARÇO DE 2017.

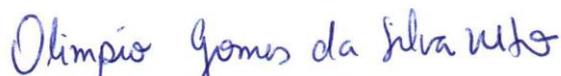
BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, UFSCar


Eduardo Hiromitsu Tanabe
UFSM


Edson Luiz Silva
UFSCar


Rafael Sartim
UFES


Olimpio Gomes da Silva Neto
IF SUL DE MG

*À minha família,
meus maiores incentivadores*

AGRADECIMENTOS

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

Aos orientadores deste trabalho, Prof^a Mônica e Prof. Eduardo, pela orientação, oportunidade, ensinamentos transmitidos, valiosas contribuições e principalmente por terem acreditado neste trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Química, que tanto contribuíram para minha formação acadêmica e crescimento profissional.

Aos meus pais, Maurílio e Soraya, minha irmã, Laila, e a todos meus familiares por todo amor, incentivo e estarmos sempre unidos.

Ao meu noivo, Amilcar, por todo amor, carinho, ajuda, incentivo e compreensão, e por estar sempre ao meu lado.

Aos amigos por todo incentivo, troca de experiências, momentos de descontração e amizade construída durante este período em São Carlos.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e ao Departamento de Engenharia Química da UFSCar pela infraestrutura 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.

RESUMO

O objetivo do trabalho foi caracterizar diferentes filtros fibrosos depois de submetidos a filtrações e avaliar o desempenho do tratamento da superfície destes materiais durante a operação de filtração por pulso de ar reverso, na remoção de partículas micrométricas de calcário dolomítico. Os ensaios de filtração foram realizados mantendo-se a velocidade de filtração constante a 4 cm/s. Os parâmetros operacionais de limpeza do meio filtrante utilizados foram 200 ms e 2 kgf/cm², correspondente ao tempo e a pressão do pulso de limpeza, respectivamente. Os resultados obtidos experimentalmente foram: queda de pressão residual, tempo do ciclo, massa retida, eficiência de limpeza e de coleta, profundidade de deposição de partículas, número de partículas depositadas, tamanho das partículas depositadas, permeabilidade, porosidade, espessura, rugosidade e diâmetro médio das fibras dos meios filtrantes. Deste modo, na comparação de filtros fibrosos de mesma fibra (fibra de poliéster), os resultados apresentaram diferentes desempenhos durante a filtração devido as diferentes superfícies, sem tratamento e com tratamento (calandrado/chamuscado e calandrado/termofixado). Os filtros sem tratamento na superfície apresentaram uma maior eficiência de limpeza, uma menor queda de pressão residual e uma maior permeabilidade após cinquenta regenerações. Porém, observou-se um maior desgaste nas fibras. Entretanto, os filtros fibrosos com tratamentos nas superfícies apresentaram valores próximos de permeabilidade, menores eficiências de limpeza e maiores queda de pressão residual após 50 ciclos de filtração. Além disso, esses filtros fibrosos com tratamento de superfície apresentaram uma maior eficiência de coleta após os ciclos de filtração, em relação ao filtro fibroso sem tratamento de superfície. Isto mostra que o tratamento na superfície do meio filtrante é indispensável para ciclos com longa duração utilizando o pulso de ar reverso. Na comparação de meios filtrantes de fibras de poliéster e de polipropileno submetidos ao mesmo tratamento físico (calandrado/termofixado), os resultados apresentaram uma alta eficiência de limpeza nos ciclos iniciais, porém ocorreu uma diminuição da eficiência de limpeza com o aumento dos ciclos de filtração. Além disso, após os 100 ciclos de filtração, o meio filtrante de fibras de poliéster apresentou maior eficiência de limpeza, maior eficiência de coleta, menor retenção de partículas (menor número e menor profundidade de deposição de partículas), maior permeabilidade, menor queda de pressão residual e menor massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso em relação ao meio filtrante de polipropileno com imersão em PTFE. Verificou-se ainda que, o meio filtrante de poliéster, coletou mais partículas na superfície, caracterizando uma filtração superficial e uma menor penetração das partículas de calcário dolomítico em relação ao meio filtrante de fibras de polipropileno. Estes resultados implicaram que, a porosidade superficial do meio filtrante interferiu na formação e na remoção da camada de pó formada, ajudando ou impedindo a limpeza do tecido filtrante. Assim, constatou-se que, o meio filtrante de fibras de poliéster apresentou o melhor desempenho de operação com a elevada eficiência de coleta e de limpeza.

Palavras-chave: Filtração de ar. Limpeza jato pulsante. Eficiência do meio filtrante. Tratamento de superfície.

ABSTRACT

The objective of this work was to characterize different fibrous filters after filtration and to evaluate the surface treatment performance of these materials during pulse jet filtration, in the removal of micrometric particles of dolomitic limestone. The filtration tests were performed maintaining the filtration velocity constant at 4 cm/s. The operating parameters of the cleaning media used were 200 ms and 2 kgf/cm², corresponding to the cleaning pulse time and pressure, respectively. The experimental results were: residual pressure drop, cycle time, retained mass, cleaning and collection efficiency, particle deposition depth, deposited particle size, deposited particle size, permeability, porosity, thickness, roughness and diameter of the fibers of the filter media. Thus, in the comparison of fibrous filters of the same fiber (polyester fiber), the results presented different performances during the filtration due to the different surfaces, with untreated and treated (singeing/calendering and calendering/thermofixation). Untreated surface filters showed higher cleaning efficiency, lower residual pressure drop and increased permeability after fifty regenerations. However, greater wear on the fibers was observed. The fibrous filters with surface untreated showed close permeability values, lower cleaning efficiencies and higher residual pressure drop after 50 filter cycles. In addition, these fibrous filters with surface treated presented higher collection efficiency after the filtration cycles, in relation to the fibrous filter untreated surface. This indicates that the treatment on the surface of the filter medium is indispensable for cycles with long duration using the pulse jet cleaning. In the comparison of polyester and polypropylene fiber media subjected to the same treatment (calendering/thermofixation), the results showed a high cleaning efficiency in the initial cycles, but a reduction of the cleaning efficiency occurred with the increase of the filtration cycles. Furthermore, after the 100 filter cycles, the polyester fiber media showed higher cleaning efficiency, higher collection efficiency, lower particle retention (lower number and lower particle deposition depth), higher permeability, lower residual pressure and lower mass retained after the pulse jet cleaning in relation to PTFE immersion polypropylene media. It was also verified that, the polyester filter media, collected more particles on the surface, characterizing a surface filtration and a lower penetration of the dolomitic limestone particles in relation to the polypropylene fiber filter medium. These results implied that the surface porosity of the filter medium interfered in the formation and removal of the formed powder layer, helping or preventing the cleaning of the filter medium. Thus, it was found that the polyester fiber filter media showed the best operating performance with high collection and cleaning efficiency.

Keywords: Air filtration. Pulse jet cleaning. Efficiency of the filter medium. Surface treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filtração de gases.....	3
Figura 2 – Determinação do ponto de colmatação do meio.....	4
Figura 3 – Forma dos dendritos no interior do meio filtrante.....	5
Figura 4 – Mecanismos de deposição de partículas.....	6
Figura 5 – Esquema de um filtro de mangas com sistema de limpeza por pulso de ar reverso.	11
Figura 6 – Tipos básicos de trançado (a) plano, (b) sarja 2/2 e (c) cetim.....	16
Figura 7 – Tecido não trançado.....	17
Figura 8 – Processo de consolidação por agulhagem.....	18
Figura 9 – Processo de consolidação por calandragem.....	19
Figura 10 – Mecanismos de filtração.....	24
Figura 11 – Unidade experimental de filtração.....	28
Figura 12 – Sistema de alimentação de pó.....	29
Figura 13 – Quadro de acionamento.....	30
Figura 14 – Suporte do meio filtrante.....	31
Figura 15 – Unidade experimental de eficiência de coleta.....	32
Figura 16 – Gerador de partículas (TSI 3433).....	32
Figura 17 – Ilustração do equipamento composto para a determinação da permeabilidade dos meios filtrantes.....	34
Figura 18 – Equipamento de pré-endurecimento dos meios filtrantes.....	35
Figura 19 – Vista do procedimento de endurecimento da amostra.....	36
Figura 20 – Amostras embutidas do meio filtrante.....	37
Figura 21 – Esquema do esmerilamento da amostra.....	37
Figura 22 – Esquema do polimento da amostra.....	38
Figura 23 – Comparação entre (a) a microfotografia da foto original e (b) a binarizada pelo software.....	39
Figura 24 – Imagem da profundidade de deposição de partículas no meio filtrante.....	39
Figura 25 – Representação esquemática dos capítulos de resultados e discussões.....	40
Figura 26 – (a) imagem obtida em MEV-FEG e (b) análise EDS do material particulado.....	44
Figura 27 – Distribuição granulométrica do calcário dolomítico.....	45
Figura 28 – Concentração de partículas e massa acumulada em função do diâmetro aerodinâmico.....	45
Figura 29 – MEV da superfície do meio filtrante de fibras de acrílico.....	46
Figura 30 – Massa retida em função da pressão do pulso de limpeza.....	47
Figura 31 – Queda de pressão residual em função da pressão do pulso de limpeza.....	47
Figura 32 – Eficiência de limpeza em função da pressão do pulso de limpeza.....	48
Figura 33 – MEV dos meios filtrantes de fibras de poliéster (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP.....	53
Figura 34 – Queda de pressão em função do tempo de filtração, utilizando os filtros de fibras de poliéster (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP ($\Delta P_{m\acute{a}x} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s =$ 4 cm/s; 50 ciclos).....	54
Figura 35 – Curva média dos três testes experimentais, de queda em função do tempo de filtração, referente ao primeiro ciclo de filtração, utilizando o meio filtrante de fibra de poliéster, sem tratamento (NT), chamuscado e calandrado (TCC) e calandrado e termofixado com anti-pilling (TCT-AP) ($\Delta P_{m\acute{a}x} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 1 ciclo).....	55

Figura 36 – Massa retida em função do número de ciclos, utilizando os filtros fibrosos (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP ($\Delta P_{\text{máx}} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 50 ciclos).	56
Figura 37 – Eficiência de limpeza em função do número de ciclos de filtração, utilizando os filtros fibrosos (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP ($\Delta P_{\text{máx}} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 50 ciclos).	57
Figura 38 – Queda de pressão residual em função do número de ciclos ($\Delta P_{\text{máx}} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 50 ciclos).	58
Figura 39 – Queda de pressão/espessura em função da velocidade superficial do gás para os meios filtrantes (a) virgem, (b) após 1 ciclo, (c) após 25 ciclos e (d) após 50 ciclos de filtração.	59
Figura 40 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.	61
Figura 41 – Meio filtrante de superfície não tratada NT após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.	62
Figura 42 - Meio filtrante de superfície calandrado e chamuscado TCC após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.	63
Figura 43 - Meio filtrante de superfície calandrado e termofixado TCT-AP após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.	63
Figura 44 – Ensaio de filtração em $\Delta P_{\text{máx}}$ de (a) 100 Pa e (b) 1000 Pa ($t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	67
Figura 45 – Tempo de duração do ciclo em função do número de ciclos.	67
Figura 46 – Queda de pressão residual em função do número de ciclos.	68
Figura 47 – Massa retida após a limpeza em função do número de ciclos.	69
Figura 48 – Eficiência de limpeza em função do número de ciclos de filtração.	69
Figura 49 - Velocidade superficial do gás em função da queda de pressão, obtida para a determinação da permeabilidade dos filtros fibrosos, após o (a) primeiro e (b) centésimo ciclo de filtração.	70
Figura 50 - Eficiência fracionária de coleta dos filtros fibrosos após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos, (c) 50 ciclos, (d) 100 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.	71
Figura 51 – MEV dos meios filtrantes com ampliação 35X (a) filtro A e (b) filtro B.	76
Figura 52 – MEV dos meios filtrantes com ampliação 30 X (a) filtro A e (b) filtro B.	77
Figura 53 – Imagens dos meios filtrantes em microscópio óptico, (a) filtro A e (b) filtro B.	77
Figura 54 – Ensaio de filtração (a) filtro A e (b) filtro B ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	79
Figura 55 – Tempo de duração do ciclo em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	80
Figura 56 – Queda de pressão residual em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	81
Figura 57 – Massa retida em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	81
Figura 58 – Eficiência de limpeza em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	82
Figura 59 – Velocidade superficial do gás em função da queda de pressão, obtida para a determinação da permeabilidade dos filtros fibrosos após (a) 1 ciclo e (b) 100 ciclos de filtração.	83
Figura 60 – Resistência específica do meio filtrante em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm ² ; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).	84
Figura 61 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes virgens.	85
Figura 62 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 1 ciclo de filtração.	85

Figura 63 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 25 ciclos de filtração.....	86
Figura 64 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 50 ciclos de filtração.....	86
Figura 65 - Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 75 ciclos de filtração.	87
Figura 66 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 100 ciclos de filtração.....	87
Figura 67 – Imagens de MEV das partículas depositadas no meio filtrante A após (a) 1 ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração.	89
Figura 68 – Imagens de MEV das partículas depositadas no meio filtrante A após (a) 1 ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração.	90
Figura 69 - Imagens de MEV de partículas de calcário dolomítico depositadas no interior do meio filtrante A: (a) 1 ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração (com ampliação 200x).	91
Figura 70 - Imagens de MEV de partículas de calcário dolomítico depositadas no interior do meio filtrante B: (a) primeiro ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração (com ampliação 200x).	92
Figura 71 – Número total de partículas em função da profundidade média de deposição das partículas após 1 ciclo de filtração.	93
Figura 72 – Número total de partículas em função da profundidade média de deposição das partículas após 50 ciclos de filtração.	93
Figura 73 – Número total de partículas em função da profundidade de deposição das partículas após 100 ciclos de filtração.	94
Figura 74 – Número total de partículas em função do tamanho médio de partículas depositadas após 1 ciclo de filtração.....	95
Figura 75 – Número total de partículas em função do tamanho médio de partículas depositadas após 50 ciclos de filtração.	95
Figura 76 – Número total de partículas em função do tamanho médio de partículas depositadas após 100 ciclos de filtração.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Designação dos testes realizados.	43
Tabela 2 – Características do meio filtrante.	46
Tabela 3 – Características dos meios filtrantes.	52
Tabela 4 – Permeabilidade dos meios filtrantes (k_1).	60
Tabela 5 - Permeabilidade dos meios filtrantes.	71
Tabela 6 – Características dos meios filtrantes.	78
Tabela 7 – Permeabilidade dos meios filtrantes.	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Trabalhos relevantes sobre a análise das filtrações por pulso de ar reverso. 12

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f	Área das fibras
A_t	Área total da imagem
B_C	Permeabilidade da torta
B_M	Permeabilidade de regeneração do meio filtrante
c	Concentração de pó
C_f	Concentração de partículas no ar após a passagem pelo meio filtrante
C_i	Concentração de partículas no ar a ser filtrado
D	Coefficiente de difusividade
d_f	Diâmetro do elemento coletor
d_p	Diâmetro das partículas
E	Eficiência de coleta do meio filtrante
F_S	Fator de escorregamento de Cunningham
g	Aceleração da gravidade
K	Coefficiente hidrodinâmico de Kuwabara
k_I	Constante de permeabilidade do meio poroso
K_B	Constante de Boltzman
kc	Resistência específica da torta
K_M	Parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem
km	Resistência do meio filtrante
L	Espessura do meio filtrante
L_C	Espessuras da torta e são as e da torta,
m_f	Densidade mássica por área do filtro
MP	Material particulado
NO_x	Óxidos de nitrogênio
P	Penetração
Pe	Número de Peclet,
q	Carga da partícula
R	Parâmetro de interceptação direta
Se	Eficiência total de separação
S_t	Número de Stokes
SO_2	Dióxido de enxofre

XIV

T	Temperatura absoluta
t_c	Tempo de ciclo
t_f	Tempo de filtração
t_L	Tempo de limpeza por pulso de ar
v_s	Velocidade superficial do gás
v_t	Velocidade terminal da partícula
w	Massa da torta por unidade de área
α	Densidade de empacotamento do filtro (adimensional)
γ_C	Coeficiente de polarização do coletor
ΔP	Queda de pressão total
ΔP_c	Queda de pressão da torta de filtração
ΔP_i	Queda de pressão inicial
ΔP_M	Queda de pressão no meio filtrante
ΔP_M	Queda de pressão no meio filtrante
ΔP_R	Queda de pressão residual
ε	Porosidade do filtro
ε_0	Permissividade no vácuo
ε_C	Constante dielétrica da partícula
ε_c	Porosidade da torta
ε_{exp}	Porosidade experimental do meio filtrante
E_f	Constante dielétrica do fluido
η_D	Eficiência do mecanismo difusional
η_E	Eficiência do mecanismo eletroforético
η_G	Eficiência do mecanismo gravitacional
η_I	Eficiência do mecanismo inercial
η_{ID}	Eficiência do mecanismo interceptação direta
η_L	Eficiência de limpeza por pulso de ar
η_T	Eficiência total de coleta
μ	Viscosidade do fluido
ρ_f	Densidade da fibra
ρ_g	Densidade do gás

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE QUADROS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO 2 – PRINCÍPIOS DA FILTRAÇÃO DE GASES	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Mecanismos de coleta.....	6
2.2.1 Mecanismo difusional.....	7
2.2.2 Mecanismo inercial.....	7
2.2.3 Mecanismo de interceptação direta	8
2.2.4 Mecanismo gravitacional.....	8
2.2.5 Mecanismo eletroforético	9
2.3 Mecanismos de limpeza.....	9
2.3.1 Limpeza por pulso de ar reverso (pulse-jet cleaning).....	10
2.4 Meios filtrantes	14
2.4.1 Tecidos trançados	15
2.4.2 Tecidos não trançados (feltros).....	16
2.4.3 Métodos de finalização de tecidos não trançados.....	17
2.4.3.1 Mecânico	17
2.4.3.2 Químico	18
2.4.3.3 Térmico.....	18
2.5 Permeabilidade do meio filtrante.....	19
2.6 Densidade de empacotamento	21
2.7 Eficiência de coleta.....	21
2.8 Porosidade do meio filtrante.....	21
2.9 Velocidade de filtração.....	22
2.10 Deposição de partículas no meio filtrante	24
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS ADOTADOS NA OPERAÇÃO DE FILTRAÇÃO DE GASES	26
3.1 Materiais	26
3.1.1 Material particulado.....	26
3.1.2 Meios filtrantes	26
3.2 Unidade experimental de filtração.....	28
3.2.1 Alimentador de partículas.....	29
3.2.2 Aquisição de dados.....	30
3.2.3 Suporte do meio filtrante	31
3.3 Unidade experimental de eficiência de coleta	31
3.4 Permeabilidade dos meios filtrantes	33
3.5 Deposição das partículas no filtro fibroso	34
CAPÍTULO 4 - INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE LIMPEZA	41
4.1 Introdução.....	41
4.2 Materiais e métodos.....	42

4.2.1 Materiais.....	42
4.2.2 Procedimento experimental.....	42
4.3 Resultados e discussões	44
4.3.1 Caracterização dos materiais.....	44
4.3.2 Investigações dos parâmetros operacionais de limpeza	46
4.4 Considerações finais	49
CAPÍTULO 5 – INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE NO DESEMPENHO DOS FILTROS FIBROSOS	50
5.1 Introdução	50
5.2 Materiais e métodos	50
5.2.1 Materiais.....	51
5.2.2 Procedimentos experimentais	51
5.3 Resultados e discussões	52
5.3.1 Caracterização dos meios filtrantes.....	52
5.3.2 Ensaio de filtração	53
5.3.3 Eficiência de limpeza	56
5.3.4 Permeabilidade dos filtros fibrosos.....	58
5.3.5 Eficiência de coleta dos filtros fibrosos	60
5.4 Considerações finais	64
CAPÍTULO 6 – INFLUÊNCIA DA QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA NO DESEMPENHO DO MEIO FILTRANTE	65
6.1 Introdução	65
6.2 Materiais e métodos	65
6.2.1 Materiais.....	65
6.2.2 Procedimentos experimentais	66
6.3 Resultados e discussões	66
6.3.1 Características do meio filtrante após a filtração.....	66
6.4 Considerações finais	72
CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS APÓS A REGENERAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES	73
7.1 Introdução	73
7.2 Materiais e métodos	73
7.2.1 Materiais.....	73
7.2.2 Procedimentos experimentais	74
7.3 Resultados e discussão	75
7.3.1 Caracterização dos filtros fibrosos	76
7.3.2 Testes de filtração e limpeza	78
7.3.3 Análises dos meios filtrantes.....	82
7.3.4 Análise da deposição de partículas	88
7.4 Considerações finais	96
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES .	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Os graves problemas ambientais relacionados à poluição do ar foram intensificados com o desenvolvimento da indústria. Normalmente, o ar poluído contém substâncias químicas nocivas (por exemplo, SO₂, NO_x) e partículas finas em suspensão (MP), que podem desencadear efeitos nocivos à função imunológica, do sistema respiratório e nervoso central (QIAN e YU, 2012; LI et al, 2016).

Além das questões ambientais, as técnicas de recuperação de partículas emitidas também são importantes para as indústrias, devido ao valor que pode ser adicionado ao produto recuperado e não liberado na atmosfera, aumentando assim, os lucros totais da indústria (TANABE et al., 2011).

Das várias tecnologias limpas de purificação do ar, a filtração de ar por filtros fibrosos é um dos métodos mais eficientes de separação sólido-gás, principalmente, envolvendo micropartículas e nanopartículas (TANABE et al, 2011; BALGIS et al, 2015).

No setor industrial, o filtro de mangas é um equipamento de controle de poeira, conhecido pelo controle de partículas finas durante a fabricação de cimento, de materiais de construção e de alimentos, assim como, nas operações de metalurgia, de incineração de resíduos, de fornos industriais e de purificação de gás empoeirado à temperatura ambiente ou a temperaturas mais elevadas (ZHOU et al., 2013).

O princípio de funcionamento da operação de filtração de ar está relacionado à utilização de um meio poroso permeável para reter as partículas do fluxo de ar, uma vez que, quando um fluxo de ar carregado de partículas atravessa os meios filtrantes a uma velocidade constante (tipicamente 2-6 cm/s) as partículas são coletadas e formam uma torta de pó sobre a superfície desse filtro (LO et al., 2010). Esse comportamento apresenta três fases diferentes: filtração de profundidade, regime de transição e filtração de superfície (HSIAO e CHEN, 2015).

Durante a formação da torta, a queda de pressão através do filtro apresenta um aumento (LO et al, 2010;.. ZHANG et al, 2015), sendo necessária sua remoção para sustentar uma operação de filtração semi-contínua, à medida que, a queda de pressão apresenta um

valor limite máximo ou um intervalo de tempo pré-definido (SALEEM e KRAMMER, 2007; SALEEM et al., 2012).

Assim, periodicamente, os métodos de limpeza (agitação mecânica, fluxo e pulso de ar reverso) são adotados para desalojar a torta de pó do meio filtrante (LO et al., 2010). No entanto, a limpeza por pulso de ar reverso é o método eficaz e amplamente utilizado para a regeneração do meio filtrante, uma vez que, permite a limpeza frequente, enquanto o filtro está em funcionamento (LI et al, 2015;. ANDERSEN et al, 2016).

Grande parte dos trabalhos encontrados na literatura refere-se ao desempenho do meio filtrante em relação aos parâmetros operacionais de filtração adotados, como no caso de Silva et al. (1999); Cheng e Tsai (1998); Saleem e Krammer (2007); Fotovati et al. (2012); Lupion et al. (2013); Simon et al. (2014); Li et al. (2015). No entanto, os trabalhos científicos que relacionam ao tratamento da superfície dos meios filtrantes durante a filtração foram em menor número encontrados na literatura como no caso de Hindy, Sievert e Loffer (1987); Jiang et al. (2008); Qian et al. (2015); Li et al. (2015); Cirqueira et al. (2017). Apesar da crescente utilização de meios filtrantes com tratamento de superfície adicional, a influência do tratamento de superfície não tem sido extensivamente estudada.

Desta forma, se verifica a importância de se investigar as características do meio filtrante bem como a influência que gera no desempenho da operação de filtração. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho dos tratamentos das superfícies dos meios filtrantes submetidos à filtração por pulso de ar reverso. Os parâmetros avaliados durante os ciclos de filtrações foram à eficiência (de coleta e de limpeza), a permeabilidade, a porosidade, a resistência, a queda de pressão e a massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso.

Na realização deste trabalho foi proposta uma organização em capítulos, que iniciam com uma revisão bibliográfica da literatura científica (Capítulo 2), seguida da apresentação dos procedimentos experimentais adotados na execução deste trabalho (Capítulo 3), dos resultados e das discussões dos mesmos, em estrutura de artigo, sendo estes divididos em introdução, metodologia, resultados e se encerram com as principais considerações finais de cada etapa (Capítulos 4, 5, 6 e 7). Assim, esta tese se encerrará no Capítulo 8, que discute algumas sugestões para trabalhos posteriores, com base nos resultados deste trabalho.

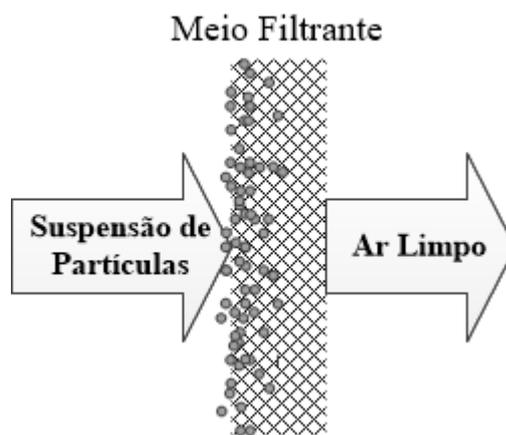
CAPÍTULO 2 – PRINCÍPIOS DA FILTRAÇÃO DE GASES

Este capítulo é composto por uma revisão da literatura sobre os principais aspectos que estão relacionados à filtração de gases, buscando um melhor entendimento do contexto em que se insere este trabalho.

2.1 Introdução

A filtração de gases é uma operação de separação que apresenta como característica principal a remoção de partículas sólidas suspensas na corrente de ar, por meio de um meio filtrante, poroso e permeável. As partículas podem ficar coletadas no interior do meio filtrante, consequência da filtração de profundidade, e/ou na superfície do meio filtrante, consequência da filtração superficial, que é o resultado da formação de uma camada de pó na superfície, denominada por torta de filtração (DULLIEN, 1989; DONOVAN, 1985). Na Figura 1 está apresentada uma ilustração da operação de filtração de gases.

Figura 1 – Filtração de gases.



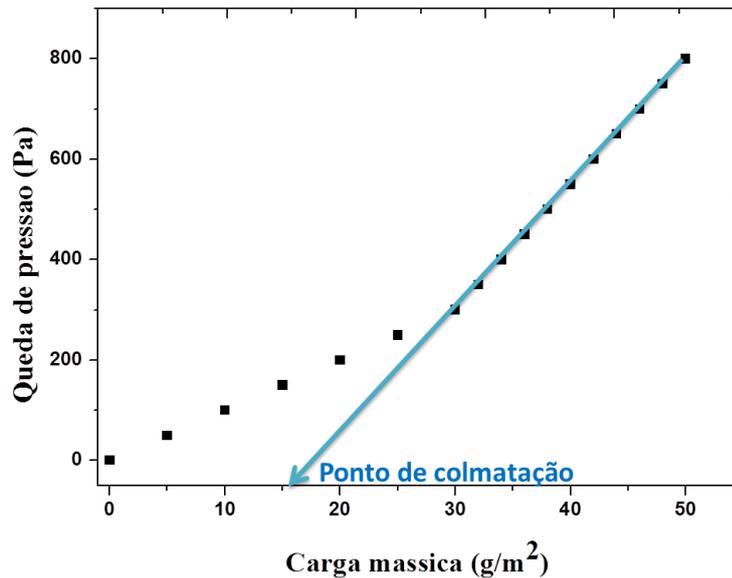
Fonte: Acervo pessoal.

A formação da torta é o momento de transição entre filtração superficial e profundidade, que pode ser entendida como a capacidade de coleta do filtro fibroso, conhecido por ponto de colmatação ou por ponto de entupimento do meio filtrante. Este momento de formação da torta pode ser obtido por meio do prolongamento da parte linear da curva ao eixo das abscissas, a partir da curva de queda de pressão em função da massa acumulada, método este proposto por Walsh (1996). Este método permite encontrar a massa

necessária para o início da formação da torta e foi utilizado por vários autores para encontrar o ponto de colmatação como Tognetti, 2007; Rocha, 2010; Barros, 2014.

Na Figura 2 está apresentada a determinação do ponto de colmatação do meio filtrante, dado pelo lugar geométrico obtido pelo gráfico de queda de pressão em função da carga mássica, correspondente ao cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas.

Figura 2 – Determinação do ponto de colmatação do meio.



Fonte: Adaptado de Walsh (1996).

A colmatação ocorre mais rapidamente na coleta de partículas menores e quanto mais densamente empacotados forem os meios filtrantes utilizados, devido ao menor espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas (WALSH e STENHOUSE, 1997).

Além disso, a formação da torta também é influenciada por fatores como a velocidade de filtração, a concentração de pó, os limites de queda de pressão e a resistência dos meios filtrantes (SALEEM et al., 2012).

Com a formação da torta ocorre o aumento da queda de pressão, devido ao aumento da resistência à passagem do fluxo, provocada pela deposição de partículas (LO et al, 2010; SALEEM et al., 2012; ZHANG et al, 2015). Normalmente, a queda de pressão total, ΔP , é representada pela soma da queda de pressão do filtro e da queda de pressão referente à camada de material particulado depositado, como indicado pela equação (MATTESON e ORR, 1987; CHENG e TSAI, 1998; SALEEM et al., 2012):

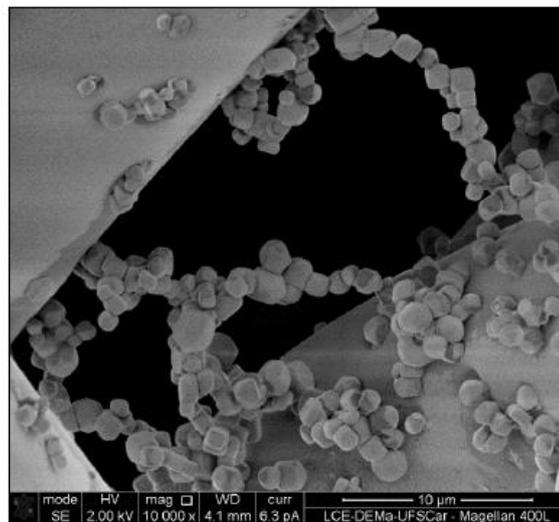
$$\Delta P = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (1)$$

sendo ΔP_M e ΔP_C as quedas de pressão referentes ao meio filtrante e à torta, respectivamente.

Após a fase inicial da filtração e a deposição das partículas no meio filtrante, aumenta-se a eficiência de coleta, devido à formação de cadeias estreitas de partículas sobre as fibras dos filtros conhecidos como dendritos (BARROS, 2014). A formação destes dendritos foi detalhada por Payatakes e Tien (1976).

Na Figura 3 está apresentada a forma dos dendritos, de partículas nanométricas de cloreto de sódio de densidade $2,165 \text{ g/cm}^3$, observados no filtro fibroso de poliéster, cujo diâmetro médio das fibras corresponde a $19,39 \mu\text{m}$.

Figura 3 – Forma dos dendritos no interior do meio filtrante.



Fonte: BARROS, 2014.

Com a formação dos dendritos, inicia-se a fase de transição da filtração, em que as partículas passam a atuar como coletores, uma vez que, passam a ocorrer à interação partícula-partícula (RAMARAO e TIEN, 1988; FU et al, 2014).

Assim, as partículas que são depositadas na superfície do meio filtrante, passam a ser coletadas pelas próprias partículas capturadas; esta etapa é chamada de filtração superficial (RAMARAO e TIEN, 1988). Este comportamento assemelha-se ao observado por Barros, 2014.

Mukhopadhyay e Pandit (2014) comentaram que a filtração apresentou um efeito positivo devido a maior eficiência de filtração associada à presença da torta de filtração, e, por outro lado, apresentou um efeito negativo, associado com o aumento da queda de pressão.

2.2 Mecanismos de coleta

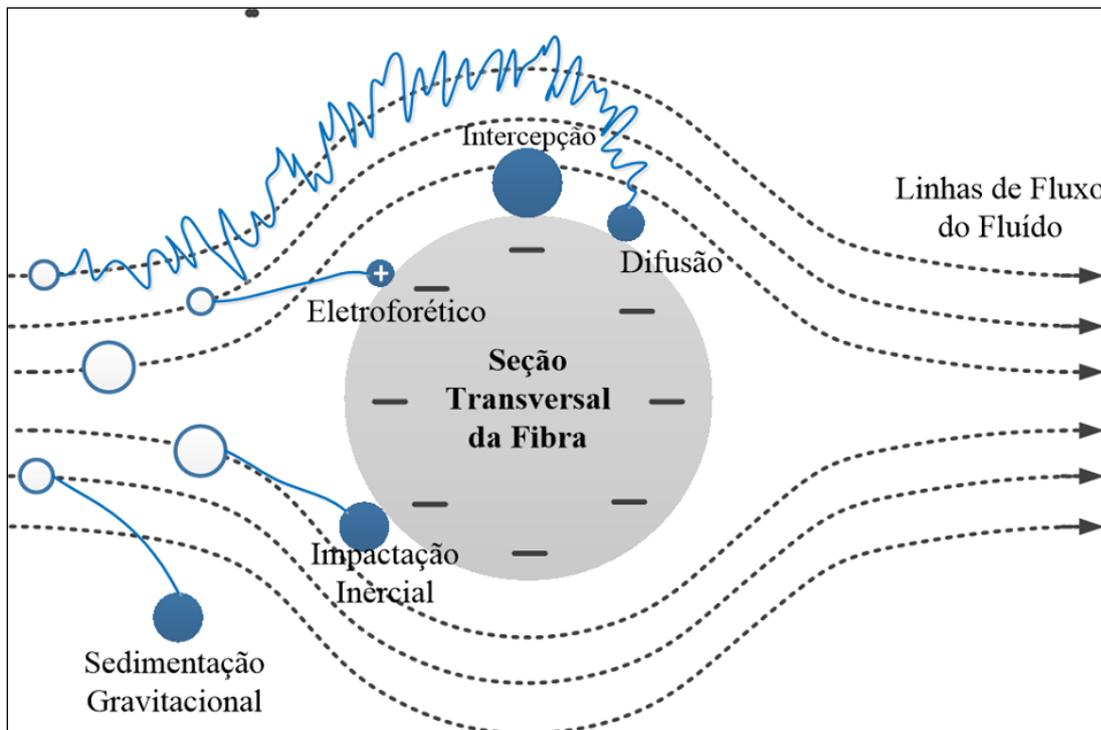
A coleta das partículas em filtros fibrosos ocorre inicialmente por meio das fibras, devido à ação de mecanismos como: difusional, inercial, interceptação direta, sedimentação gravitacional e ação eletrostática. Desta forma, a eficiência de coleta pode ser obtida pela soma das eficiências de cada mecanismo atuante (MATESON e ORR, 1987; HINDS, 1998):

$$\eta_T = \eta_D + \eta_{ID} + \eta_I + \eta_G + \eta_E \quad (2)$$

em que η_T é a eficiência total de coleta, η_D é a eficiência do mecanismo difusional, η_{ID} é a eficiência do mecanismo interceptação direta, η_I é a eficiência do mecanismo inercial, η_G é a eficiência do mecanismo gravitacional e η_E é a eficiência do mecanismo eletroforético.

Na Figura 4 está apresentada uma comparação entre os mecanismos de coleta que podem atuar sobre uma fibra do meio filtrante. Porém, estes mecanismos serão detalhados adiante.

Figura 4 – Mecanismos de deposição de partículas.



Fonte: Acervo pessoal.

Dentre os mecanismos de coleta convencionais, o inercial, a interceptação e o difusional são os mais dominantes na fase inicial de filtração de partículas utilizando filtros de mangas devido à interação partícula-fibra. No entanto, os mecanismos são muito complexos durante a

operação de filtração contínua, porque as tortas são periodicamente formadas e removidas da superfície do filtro (PARK et al., 2012).

2.2.1 Mecanismo difusional

O mecanismo difusional é atuante em partículas de diâmetro menores que 1 μm e em baixas velocidades de filtração. Neste mecanismo, as linhas de corrente não coincidem com a trajetória das partículas, por se tratarem de partículas de tamanho muito reduzido e de movimento aleatório, referente ao movimento Browniano (HINDS, 1998). A eficiência de coleta de cada fibra referente à ação deste mecanismo pode ser obtida (LEE e LIU, 1982):

$$\eta_D = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{K} \right)^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (3)$$

em que K é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara e Pe é o número de Peclet, conforme as equações a seguir:

$$K = -\frac{1}{2} \ln(1-\varepsilon) - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{1}{4}(1-\varepsilon)^2 \quad (4)$$

$$Pe = \frac{v_s d_f}{D} \quad (5)$$

sendo que v_s é a velocidade superficial do gás, d_f é o diâmetro da fibra e ε é a porosidade do meio filtrante. Considerando partículas de diâmetros esféricos d_p , o coeficiente de difusividade (D) pode ser obtido:

$$D = \frac{K_B T F_S}{3\pi\mu d_p} \quad (6)$$

sendo que K_B é a constante de Boltzman, T a temperatura absoluta, μ a viscosidade do fluido e F_S o fator de escorregamento de Cunningham.

2.2.2 Mecanismo inercial

O mecanismo inercial é atuante devido à inercia das partículas. Neste mecanismo, 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. A descrição é dada por meio do número de Stokes (S_t), visto que, altos números de Stokes refletem uma alta probabilidade de coleta por este mecanismo e baixos números de Stokes refletem uma baixa probabilidade de coleta, podendo ser obtido (DULLIEN, 1989):

$$S_i = \frac{F_s d_p^2 \rho_p v_s}{18 \mu d_f} \quad (7)$$

em que ρ_p e d_p são, respectivamente, a densidade e o diâmetro das partículas.

Assim, Friendlander e Pasceri (apud SPURNY, 1998) determinaram uma equação para obter a eficiência de coleta por este mecanismo:

$$\eta_i = 0,075 St^{6/5} \quad (8)$$

2.2.3 Mecanismo de interceptação direta

O mecanismo de interceptação direta ocorre quando uma partícula colide com aderência na fibra do tecido, sem se desviar para fora do fluxo da circulação, seguindo a mesma trajetória do fluxo original. Este mecanismo depende do tamanho da partícula (d_p) e do elemento coletor (d_f), sendo mais pronunciado em partículas de tamanho superior a 1 micrón (COURY, 1983; HINDS, 1998), que possuem o raio maior que o espaçamento entre as fibras (THEODORE, 2008).

O efeito de interceptação direta pode ser calculado por (LEE e LIU, 1982):

$$\eta_{ID} = 0,6 \frac{\varepsilon}{K} \left(\frac{R^2}{1+R} \right) \quad (9)$$

em que

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (10)$$

2.2.4 Mecanismo gravitacional

O mecanismo gravitacional é decorrente do efeito da gravidade sobre a partícula, causando um desvio da sua trajetória normal, devido à influência da gravidade. Por isso, a eficiência de coleta por ação deste mecanismo depende da direção do fluxo, uma vez que, quando o sentido do fluxo é de cima para baixo, maior é a eficiência. Assim, as partículas maiores que 30 μm estão mais sujeitas a sofrerem esse desvio da trajetória normal (HINDS, 1998). Podendo ser estimado pela equação (HINDS, 1998; TIEN, 2007):

$$\eta_G = \frac{(1-\varepsilon)^{2/3} v_t}{v_s} \quad (11)$$

tal que v_t é a velocidade terminal da partícula, determinada por:

$$v_t = \frac{d_p^2 g \rho_p}{18\mu} \quad (12)$$

sendo g a aceleração da gravidade.

2.2.5 Mecanismo eletroforético

O mecanismo eletroforético é o resultado da ação de forças eletrostáticas, responsáveis pela presença de cargas elétricas nas fibras dos filtros, que formam um campo elétrico externo e um aumento na eficiência de coleta. Esse mecanismo é mais atuante em precipitadores eletrostáticos (HINDS, 1998) e pode ser determinado (COURY, 1983):

$$\eta_E = 8,242 K_M^{0,494} \quad (13)$$

sendo que K_M pode ser obtido por:

$$K_M = \frac{\gamma_c F_s q^2}{3\pi^2 \varepsilon_0 d_p d_f^2 \mu v_s} \quad (14)$$

em que ε_0 é a permissividade no vácuo, correspondente ao valor de $8,855 \times 10^{-12}$ A.s/V.m, q é a carga da partícula e γ_c é o coeficiente de polarização do coletor, conforme a equação:

$$\gamma_c = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_f}{\varepsilon_c + 2\varepsilon_f} \quad (15)$$

em que ε_c é a constante dielétrica da partícula e ε_f é a constante dielétrica do fluido.

2.3 Mecanismos de limpeza

Os filtros de mangas requerem um mecanismo de remoção das partículas retidas no meio filtrante, para que sua utilização seja economicamente competitiva (DONOVAN, 1985).

Como mencionado anteriormente, a operação de filtração resulta em aumento da queda de pressão, proveniente do aumento da espessura da torta. Assim, para assegurar a operação semi-contínua, a torta precisa ser removida, ao atingir o limite da queda de pressão máxima ou após um intervalo de tempo pré-definido (SALEEM e KRAMMER, 2007; SALEEM et al., 2012). Para tal finalidade, diferentes métodos de remoção da torta (vibração mecânica, fluxo e pulso de ar reverso) podem ser adotados (DONOVAN, 1985; LO et al., 2010).

Na limpeza por vibração mecânica as partículas são removidas da superfície do meio filtrante, pela vibração provocada por um motor entre as mangas do filtro. Porém, na limpeza

por fluxo de ar reverso, o fluxo de ar limpo é carregado até as mangas do filtro por um soprador, em direção contrária a operação de filtração (AGUIAR, 1991; NÓBREGA, 1992; RODRIGUES, 2006; TANABE et al., 2011).

No entanto, na limpeza por pulso de ar reverso (jato pulsante), o ar limpo é pulsado em forma de um jato a alta pressão até as mangas, também em direção oposta à operação de filtração. Este método tem sido amplamente utilizado para a regeneração dos meios filtrantes, uma vez que, permite uma limpeza frequente, enquanto o filtro está em operação, diferenciando dos demais métodos apresentados (ELLENBECKER e LEITH, 1980; HINDY, 1986; AGUIAR, 1991; NÓBREGA, 1992; LI et al, 2015; ANDERSEN et al, 2016).

2.3.1 Limpeza por pulso de ar reverso (*pulse-jet cleaning*)

O filtro de mangas dotado por sistema automático de limpeza das mangas filtrantes, por pulso de ar reverso, tem como princípio de funcionamento promover a injeção de um jato de ar comprimido no interior das mangas, acionado por um programa sequencial eletrônico, em tempo ou em diferença de pressão. Este jato de ar flexiona o meio filtrante e provoca a remoção da torta de partículas coletadas, que caem no cone do filtro de mangas, onde são posteriormente retiradas. Permitindo assim, a reutilização da mesma manga filtrante durante muitas operações, devido à redução da queda de pressão consequente da limpeza (SIMON et al., 2010). Na Figura 5 está apresentado um esquema de filtros de mangas acoplados a técnica de limpeza por pulso de ar reverso e seus constituintes.

A filtração por pulso de ar reverso é, portanto, um processo cíclico, com cada ciclo constituído por uma fase de filtração e uma fase de limpeza (LUPION et al., 2013). Assim, o tempo de ciclo (t_c) compreende ao tempo de filtração (t_f) e ao tempo de limpeza por pulso de ar reverso (t_L), conforme a equação (SALEEM et al., 2012):

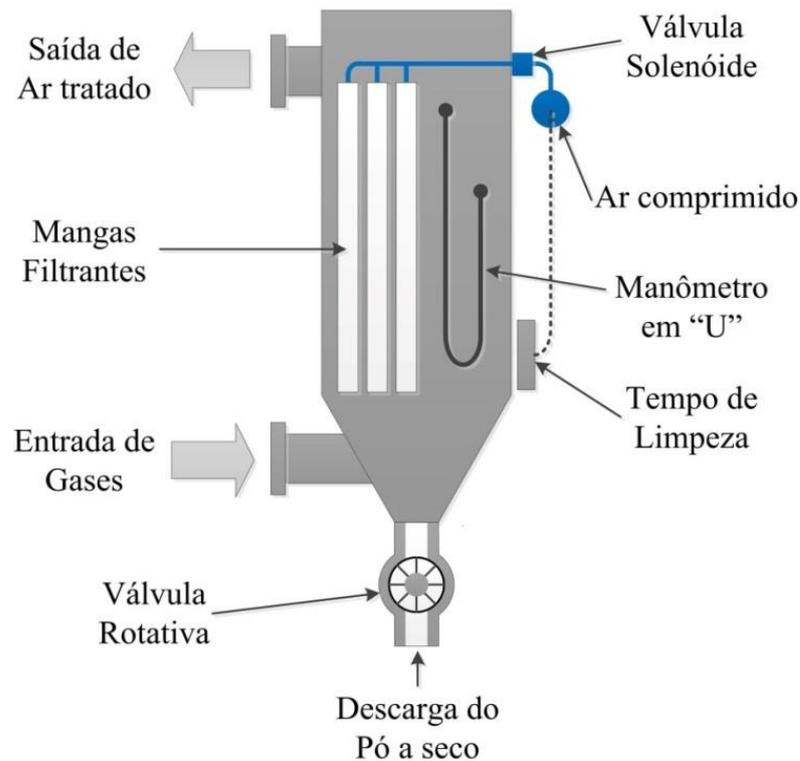
$$t_c = t_f + t_L \quad (16)$$

Geralmente, o tempo de limpeza é curto em comparação com o tempo de filtração, sendo na maioria dos casos desprezível. Desta forma, em muitos casos, o tempo de filtração representa o tempo do ciclo (SALEEM et al., 2012). Normalmente, a duração do primeiro ciclo é maior do que o segundo ciclo de filtração (JU et al., 2001). Isto ocorre devido à presença de uma camada de partículas residual e uma queda de pressão após a limpeza, pela ocorrência de limpeza irregular e/ou partículas que penetraram nos meios porosos. Esta queda de pressão registrada imediatamente após a limpeza é chamada queda de pressão residual. Entretanto, dependendo das condições de operação, a queda de pressão residual pode

continuar a aumentar de ciclo para ciclo, de modo que, uma condição de operação nunca será estável. Nesses casos, recomendam-se soluções como a intensificação de séries de pulso de limpeza ou, em última análise, a limpeza química (LUPION et al., 2013; SIMON et al., 2014).

A quantidade de operações de filtração com as mesmas mangas filtrantes irá depender dos diferenciais de pressão medidos nas mangas. Assim, a eficiência de limpeza pode ser relacionada à queda de pressão residual (LEE et al., 2015).

Figura 5 – Esquema de um filtro de mangas com sistema de limpeza por pulso de ar reverso.



Fonte: Acervo pessoal.

A eficiência da limpeza depende da maneira como ocorre a deposição das partículas na superfície do filtro e de como foi aplicado o pulso de ar, sua pressão de pulso de limpeza e o seu tempo de duração. Pressões de pulsos mais elevadas proporcionam o aumento da eficiência de limpeza. Por outro lado, pressões muito altas durante a limpeza podem danificar o meio filtrante (BERBNER e PILZ, 1996; CHI et al., 2008).

A eficiência de limpeza por pulso reverso (η_L) pode ser determinada por meio da queda de pressão no meio filtrante (ΔP_M), da queda de pressão residual (ΔP_R) e da queda de pressão inicial (ΔP_i), representada pela equação (LEE et al., 2015):

$$\eta_L = \frac{(\Delta P_M - \Delta P_R)}{(\Delta P_M - \Delta P_i)} \cdot 100 \quad (17)$$

Ellenbecker e Leith (1983) comentaram que 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. Assim, considera-se a massa do pó sobre o meio filtrante antes da limpeza é inversamente proporcional à eficiência com o qual o pulso remove as partículas do meio filtrante.

O Quadro 1 resume alguns dos trabalhos recentes publicados acerca da filtração de ar por técnica de limpeza “*pulse-jet*” e as principais conclusões obtidas nestes trabalhos.

Quadro 1 – Trabalhos relevantes sobre a análise das filtrações por pulso de ar reverso.

(continua)

Referência	Análise	Características	Principais conclusões
Saleem et al. (2012)	Efeitos das condições operacionais	3 feltros agulhados de fibras sintéticas; Pó de calcário.	- A resistência específica do meio filtrante é independente da velocidade; - A resistência específica da torta aumenta linearmente com a velocidade de filtração; - A queda de pressão residual é quase constante, independente da queda de pressão máxima;
Park et al. (2012)	Características de filtração de partículas finas em um filtro PTFE/vidro	Filtro de saco composto de PTFE/Vidro; Partículas PM 2,5	- Eficiência de coleta foi de 80% para partículas de 0,45 µm no estágio inicial de filtração. Após este estágio foi de 99,99%.
Lupion et al. (2013)	Modelo de queda de pressão em filtros a alta temperatura	4 elementos filtrantes.	- O coeficiente específico da torta depende da velocidade de filtração; - Velocidades de filtração mais elevadas resultam em maiores coeficientes de resistência específica da torta e, portanto, uma queda de pressão mais elevada; - Temperaturas elevadas levam a resistências da torta mais elevadas.
Simon et al. (2014)	Emissão de partículas durante a limpeza	Filtros de fibras de poliéster; Pó de madeira.	- Intensidades mais altas de limpeza por jato de pulso aumentam a emissão de partículas; - As partículas de madeira emitidas são predominantemente submicrônicas; - Para todas as condições de funcionamento, o meio filtrante com uma membrana polimérica foi associado com partículas de tamanhos inferiores do que os meios filtrantes comumente usados.

Quadro 1 - Trabalhos relevantes sobre a análise das filtrações por pulso de ar reverso.

(continuação)

Referência	Análise	Características	Principais conclusões
Mukhopadhyay e Bawane (2015)	Comportamento do filtro de PTFE	Meios filtrantes de fibras de poliéster tratado com PTFE e sem tratamento; Duas concentrações de pó (50 e 150 g / m ³).	<ul style="list-style-type: none"> - Emissões em termos de concentração de massa e número de partículas são mais baixas enquanto se utiliza meios filtrantes acabados com PTFE em comparação com o filtro sem acabamento; - O filtro com acabamento de PTFE é particularmente mais benéfico para capturar partículas muito finas; - Tendência de queda de pressão residual com o tempo é bastante estável para tecidos acabados PTFE.
Lee et al. (2015)	Características do desempenho da filtração	Filtros de cerâmica; Cinzas de carvão.	<ul style="list-style-type: none"> - A queda de pressão residual aumenta em proporção com a velocidade de filtração; - A eficiência global de coleta foi mais de 99,999%.
Li et al. (2016)	Análise do modelo sobre o desempenho de tecido estimulado eletrostaticamente	Tecido estimulado eletrostaticamente (ESFF).	<ul style="list-style-type: none"> - O desempenho de queda de pressão é superior com ESFF do que sem ESFF; - A pressão cai após vários ciclos de limpeza;

Fonte: Acervo pessoal.

A filtração de gases utilizando a técnica de limpeza do meio filtrante por pulso de ar reverso é considerada um dos mais promissores recursos no controle de particulados e na recuperação de materiais em diversos setores industriais nos últimos anos, visto que, ocorre em processo contínuo por regeneração do filtro em tempo real, mantendo a eficiência de coleta (PARK et al., 2012; SIMON et al., 2014; LEE et al., 2015).

A aplicação da filtração por pulso de ar reverso em processos industriais cresce cada vez mais, em processos que envolvem celulose, cimento, sabão em pó, fertilizantes, siderúrgicas e pigmentos. Entretanto, as empresas ainda apresentam a dificuldade de encontrar os melhores meios filtrantes e as melhores condições operacionais dos filtros, para cada aplicação, uma vez que, a maioria dos trabalhos encontrados na literatura está relacionada à filtração de gases por técnica de limpeza por fluxo de ar reverso (QIAN et al., 2015).

2.4 Meios filtrantes

Os meios porosos podem ter estrutura classificada como granulares ou fibrosos. Os granulares são modelados como um conjunto de partículas ou grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou randomicamente. Entretanto, os fibrosos são modelados como um conjunto de fibras, naturais ou sintéticas, retas ou curvas, randomicamente dispostas ou em malhas regulares (BARROS, 2014). Este estudo será focado na remoção de micropartículas por filtros fibrosos.

O filtro fibroso é constituído por muitas fibras em formas de filamentos, em diâmetros variados, posicionados normalmente à direção do fluido, uma vez que, o fluido atravessa para a região das fibras e as partículas suspensas são coletadas, devido à aderência à superfície da fibra (DUNNETT e CLEMENT, 2006).

A seleção dos meios filtrantes é um processo complexo e empírico a ser utilizado na operação de filtração, visto que, depende da compatibilidade dos filtros com o material particulado a ser removido e das características de cada material (BARNETT, 2000; KOCH, 2008).

Os métodos disponíveis de caracterização do meio filtrante se referem aos parâmetros tais como a permeabilidade ao ar ou as propriedades mecânicas (peso, espessura e resistência). Estes métodos são importantes para realizar uma seleção adequada do meio filtrante para uma determinada aplicação. Além disso, os resultados obtidos na caracterização podem ser utilizados para comparar o desempenho de diferentes meios filtrantes em termos de queda de pressão e emissões de partículas (KOCH, 2008).

Alguns estudos apresentam a influência da estrutura do meio filtrante na operação de filtração. Chen et al. (2001) apresentaram um estudo detalhado do comportamento de três diferentes meios filtrantes, de fibras de poliéster (PE), de ryton sulfar (RS) e de poliaramida (PA). Eles observaram que as curvas de queda de pressão em função do tempo de amostragem exibiram três regiões: uma região inicial de aumento rápido, uma região de transição e uma região linear final após o ponto de formação da torta. A região inicial de rápido aumento ocorreu devido à presença de aglomerados formados durante o processo de tratamento de superfície, ou seja, estabilização por calor e calandragem. Assim, verificou-se que, a queda de pressão do filtro depende fortemente das características do tratamento de superfície.

As mangas filtrantes aplicadas na filtração por pulso de ar reverso englobam uma variedade de materiais, incluindo as fibras sintéticas, tais como poliéster, polipropileno, poliaramida, vidro, PTFE (teflon) e outras fibras. De acordo com Buonicore e Davis (1992),

fibras sintéticas são amplamente utilizadas em tecidos de filtração, devido a seu baixo custo, melhor resistência química e à temperatura, e por apresentar pequeno diâmetro das fibras.

Os tecidos podem ser trançados ou não trançados. No entanto, na construção de mangas é mais adotado o tecido não trançado, principalmente feltros agulhados, composto por tela de sustentação cilíndrica (responsável pela resistência mecânica) e fibra com algum acabamento na superfície como o chamuscado, o plastificado, a membrana ou o espumado (DONOVAN, 1985). Estes acabamentos são utilizados para uma melhor remoção da torta de pó sobre ele formada, assegurar a estabilidade adequada ao tecido, regular a permeabilidade do tecido, minimizar a penetração de partículas e diminuir a colmatação do tecido (HARDMAN, 2001; SCHILLER e SCHMID, 2015).

2.4.1 Tecidos trançados

O tecido trançado, segundo a norma ABNT/TB-392, é produzido pelo entrelaçamento de um conjunto de fios dispostos na direção longitudinal do tecido (fios de urdume) e um conjunto de fios dispostos na direção transversal (fios de trama), formando um ângulo de aproximadamente 90°.

A confecção de um tecido trançado envolve dois processos: a partir da formação do fio (fiação) e a tecelagem (DONOVAN, 1985).

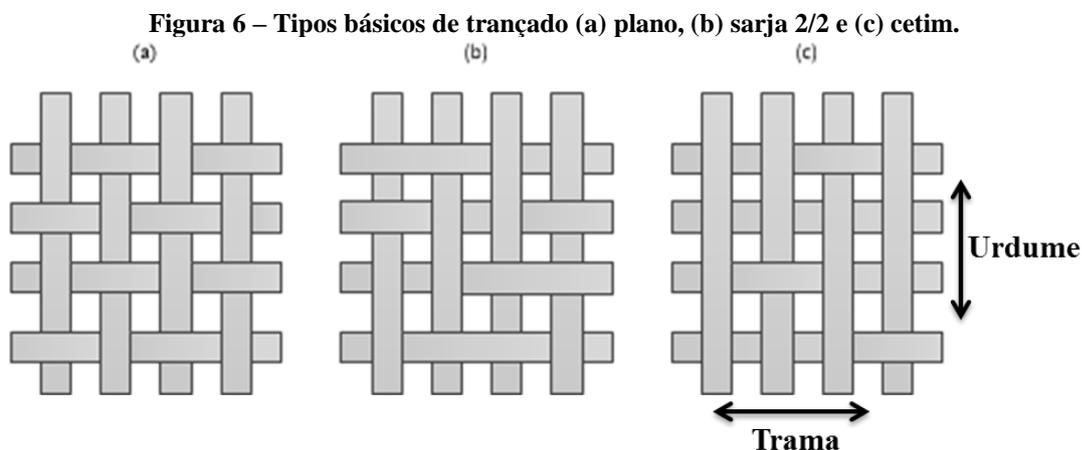
A fiação consiste na formação de fios e pode ser realizada a partir de fibras naturais de pequeno comprimento (fibras cortadas), de filamentos de fibras contínuos de extrusão ou de multifilamentos como combinação de vários filamentos contínuos. As fibras são alinhadas e torcidas para produzir o fio, denominado fio estirado. Em seguida, realiza-se o processo de cardagem, em que as fibras são penteadas para que sejam desembaraçadas e alinhadas. As fibras retiradas do aparelho de cardagem são torcidas, para que o fio adquira suas propriedades finais. Normalmente, aumentar a intensidade da torção resulta em um fio mais forte, uma vez que, o contato entre as fibras é maior e elas estão mais entrelaçadas. Porém, o excesso de torção pode torna-lo quebradiço, devendo ser evitado (DONOVAN, 1985).

Os filamentos de fibras contínuos podem ser processados em fios imediatamente após a solidificação a partir do processo de extrusão em uma fieira. Quando o processo é realizado com um filamento contínuo, forma-se um fio monofilamento. Quando vários filamentos são torcidos juntos à medida que solidificam ou depois da solidificação, um fio contínuo de multifilamentos é produzido (DONOVAN, 1985).

Os fios de multifilamento apresentam mais flexibilidade, possuem maior espessura e podem ser trançadas em estruturas mais próximas que os fios de monofilamento. Entretanto, os fios estirados são mais volumosos, rígidos e eficientes na coleta de partículas, no entanto, impõem maior dificuldade à limpeza da torta de filtração retida no tecido (RODRIGUES, 2006).

Na tecelagem, ocorre o entrelaçando dos fios uns aos outros em ângulos determinados e em sequência estabelecida. No tear, arranja-se uma série de fios paralelamente uns aos outros na direção do crescimento do tecido (fios de urdume) e outra série que intercepta a primeira e é perpendicular a ela (fios de trama ou de preenchimento). Os fios de urdume se movimentam para cima ou para baixo no tear, de modo que os fios de trama estarão acima de alguns fios de teia e abaixo de outros em determinado cruzamento de fios. Essas posições variam de acordo com o trançado desejado, que pode ser de três tipos básicos: plano, sarja ou cetim (DONOVAN, 1985).

No trançado tipo plano, o mais simples e mais barato dentre os três citados, cada fio de trama passa alternadamente abaixo e depois acima dos fios de urdume ao longo do comprimento do tecido. O trançado sarja caracteriza-se pelo entrelaçamento de mais de um e menos de quatro fios de trama em sequência ao fio de urdume. No trançado cetim, os fios de urdume passam sobre um grande número de fios de trama antes de passarem sobre um só (DONOVAN, 1985). Na Figura 6, estão apresentados os três tipos de trançado.



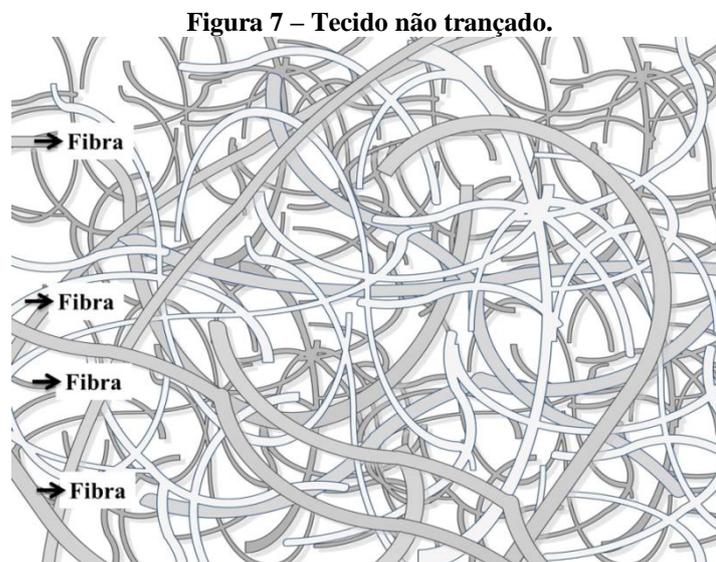
Fonte: Acervo pessoal (adaptado de Donovan, 1985).

2.4.2 Tecidos não trançados (feltros)

De acordo com a norma NBR-13370, o tecido não trançado, também chamado de feltro, é uma estrutura flexível, plana e porosa, constituída de véu ou manta de fibras e filamentos, orientados direccionalmente ou ao acaso e consolidados por processos mecânicos, químico, térmico ou combinações destes (ABINT, 2016).

Em relação à eficiência de coleta de partículas esses tecidos não trançados são mais eficientes do que tecidos trançados devido ao menor espaço vazio entre as fibras. A diminuição do diâmetro das fibras torna mais eficiente qualquer tecido. Entretanto, o aumento da eficiência implica redução na permeabilidade e na facilidade de limpeza (SUTHERLAND, 2008).

Os tecidos não trançados são fabricados inicialmente através da formação de uma manta, constituída por uma ou mais camadas de véus. O véu é a rede inicial que constitui o tecido e é obtida por processos de cardagem, fiação direta de filamentos contínuos, deposição eletrostática, suspensão em meio líquido ou por fluxo de ar. Posteriormente, dá-se a consolidação da manta, que pode ser realizada por processos químicos, mecânicos e/ou térmicos. Assim, a produção de tecidos não trançados refere-se à seleção/preparação das fibras, formação da manta, ligação/reforçamento da manta e acabamento (DIAS, 2009; ROCHA, 2010). Na Figura 7 é apresentado o tecido não trançado.



Fonte: Acervo pessoal.

2.4.3 Métodos de finalização de tecidos não trançados

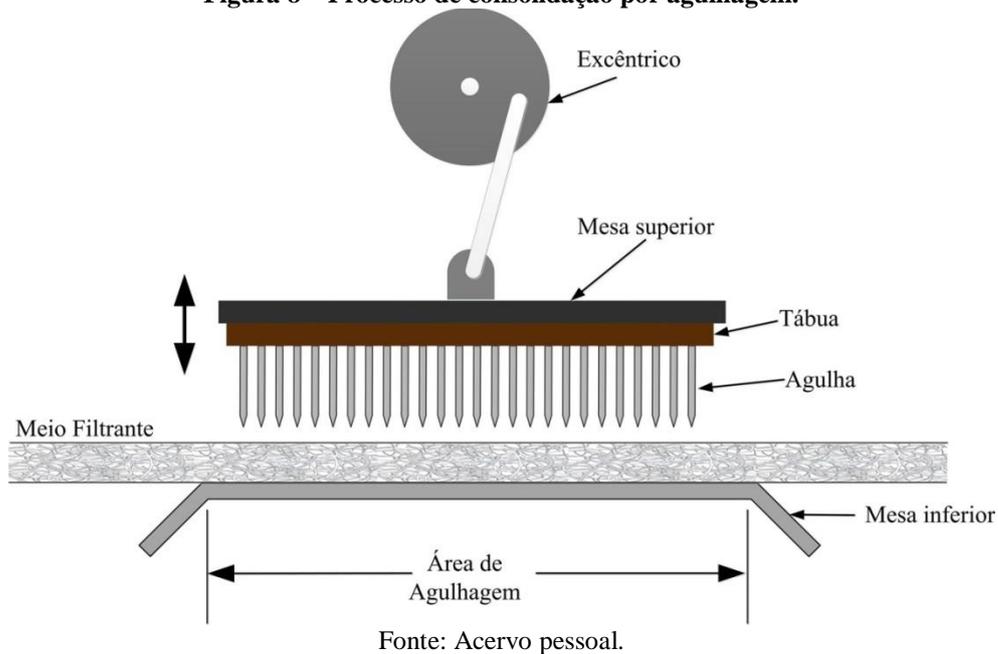
Após a confecção do tecido e a formação do véu ou da manta, o mesmo pode ser submetido ao tratamento ou método de finalização, antes de cortado e costurado, visando à melhoria de seu desempenho na operação de filtração (DONOVAN, 1985). Os processos de finalização podem ser mecânicos, térmicos ou químicos (ABINT, 2016).

2.4.3.1 Mecânico

Os processos de finalizações dos tecidos não trançados mecânicos que se destacam são (ABINT, 2016):

- Hidroentrelaçamento: o entrelaçamento das fibras ou filamentos é realizado por meio da penetração na manta por jatos d'água a altas pressões;
- Costura: ocorre por meio da inserção de fios de costura na manta ou processo sem fios, aplicado as próprias fibras para realizar a costura;
- Agulhagem: as fibras ou filamentos são entrelaçados por meio da penetração alternada de muitas agulhas que possuem saliências. Na Figura 8 é apresentado o processo de consolidação por agulhagem.

Figura 8 – Processo de consolidação por agulhagem.



2.4.3.2 Químico

Acabamentos químicos incluem revestimentos aplicados por meio de banhos, sprays ou imersões, com o objetivo melhorar parâmetros de desempenho do filtro, tais como eficiência de coleta e desprendimento da torta, vida útil e outras propriedades (DONOVAN, 1985).

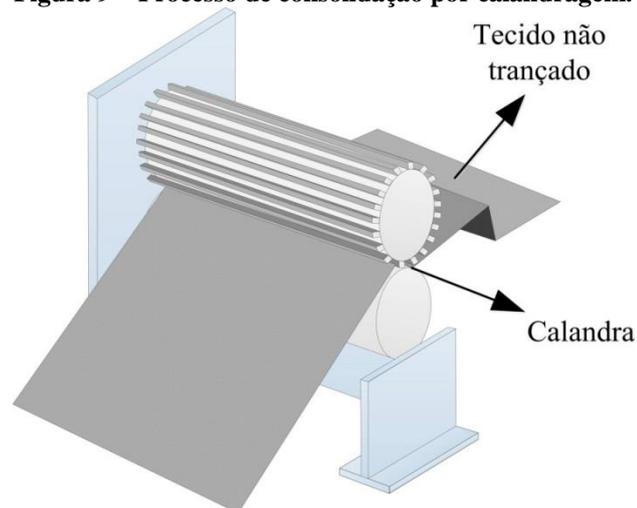
O procedimento químico que se destaca é a resinagem, em que ligantes químicos (resinas) promovem a união das fibras ou filamentos de resinagem (ABINT, 2016).

2.4.3.3 Térmico

Segundo a ABINT (2016) o processo térmico de finalização refere-se às ligações das fibras ou filamentos realizadas pela ação do calor, por meio da fusão das próprias fibras ou filamentos. Dentre os processos térmicos, destacam-se:

- Envernizamento ou envidramento: trata-se da calandragem a quente controlada, onde ocorre a fusão das fibras da superfície, resultando num aspecto vitrificado;
- Chamuscagem: esse processo utiliza uma chama para queimar e eliminar as fibras salientes da superfície;
- Calandragem: o tecido é comprimido e compactado por meio da passagem por rolos, uma ou mais vezes, podendo ser realizado a quente. Na Figura 9 está apresentado o processo de consolidação por calandragem.

Figura 9 – Processo de consolidação por calandragem.



Fonte: Acervo pessoal.

Além dos acabamentos, características como a gramatura (peso por unidade de área), a densidade (razão entre a gramatura e a espessura) e a permeabilidade do meio filtrante precisam ser observadas. Já que, uma baixa gramatura pode reduzir a vida útil da manga, uma baixa densidade pode aumentar as chances de rasgar precocemente a manga, devido à abrasão do pó sob filtração e, uma manga muito permeável apresenta uma maior tendência de penetração excessiva de pó (PACHECO, 2013).

2.5 Permeabilidade do meio filtrante

A permeabilidade é o parâmetro que leva em conta as características do fluido e a interação entre o fluido e o meio filtrante, uma vez que, representa a resistência encontrada pelo fluido ao atravessar um meio filtrante (BARROS, 2014). Este parâmetro é muito importante na seleção do meio filtrante adequado. Filtros com baixa permeabilidade apresentam baixa taxa de coleta de partículas, ou seja, o número de ciclos de filtração diminui, tornando o processo pouco vantajoso economicamente (TOGNETTI, 2007).

À medida que ocorre a deposição de partículas durante a filtração, a permeabilidade do meio filtrante é reduzida. Desta forma, a confecção de um meio filtrante visa manter sua permeabilidade inicial, de modo que a penetração de partículas no meio filtrante seja evitada durante a operação de filtração (BUONICORE, 1992).

No entanto, a permeabilidade do meio filtrante também corresponde à relação de movimentação dos gases pela operação de limpeza e da estrutura do meio filtrante, visto que, grandes poros no meio filtrante beneficiam a permeabilidade, apesar de reduzir a eficiência de coleta das partículas. O decréscimo do diâmetro dos poros diminui a permeabilidade, contudo, aumenta a retenção de partículas e a queda de pressão no meio filtrante (MÜLLER, 2008; SALVINI et al., 2000). Por isso, a permeabilidade do meio filtrante é um parâmetro importante para o melhor desempenho dos filtros de mangas, porque o desgaste das mangas depende deste parâmetro (TANABE et al, 2011). Miguel (2003) verificou que, a permeabilidade é muito influenciada pela umidade do ar.

A equação de Forchheimer é empregada para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, relacionando os valores de queda de pressão com a velocidade superficial (MIGUEL, 2003):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho_g}{k_2} v_s^2 \quad (18)$$

em que L representa a espessura do meio filtrante, μ a viscosidade do fluido, ρ_g a densidade do gás, v_s a velocidade superficial do gás, k_1 e k_2 são as constantes de permeabilidade do meio poroso.

O primeiro e o segundo termo da equação (18) referem-se aos efeitos puramente viscosos e aos efeitos cinéticos ou inerciais, respectivamente (TANABE, 2011). Para o caso de escoamento puramente viscoso, como é o caso deste trabalho, devido à aplicação de baixas velocidades de filtração, o segundo termo da equação (18) pode ser desprezado, aplicando-se assim a equação (MIGUEL, 2003):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (19)$$

A equação (19) é conhecida como equação de Darcy e é tradicionalmente utilizada para avaliar o escoamento de fluidos em meios filtrantes (AGUIAR, 1991; RODRIGUES, 2006).

2.6 Densidade de empacotamento

A densidade de empacotamento é descrita pela fração de volume total do meio filtrante ocupado por fibras, conforme a equação (DONOVAN, 1985; RODRIGUES, 2006):

$$\alpha = \frac{m_f}{\rho_f L} = \frac{\text{volume.da.fibra}}{\text{volumetotal}} = 1 - \varepsilon \quad (20)$$

sendo que α é a densidade de empacotamento do filtro (adimensional), m_f é a densidade mássica por área do filtro, ρ_f é a densidade da fibra, L é a espessura do filtro e ε é a porosidade do meio filtrante.

De acordo com o Walsh (1996), os meios filtrantes com maior densidade há menos espaço disponível para as partículas se depositarem. Por isso, à medida que se aumenta a densidade de empacotamento menor é a penetração das partículas.

2.7 Eficiência de coleta

A eficiência de coleta do meio filtrante (E) reflete na capacidade do mesmo em coletar material particulado e é calculada pelas concentrações de partículas no ar a ser filtrado antes e após a passagem do mesmo pelo meio filtrante (C_i e C_f , respectivamente), conforme a equação (HINDY, 1986):

$$E(\%) = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

A eficiência de coleta de partículas em um meio filtrante pode ser obtida pela soma das eficiências de cada mecanismo de deposição atuante (Seção 2.2). Na filtração de correntes gasosas com partículas de diâmetro maior que 2 μm , os mecanismos de captura de partículas por ação gravitacional, inercial e interceptação direta estão mais presentes. Porém, para partículas com diâmetro inferior a 2 μm , a deposição por difusão e a deposição eletrostática apresentam maior atuação na coleta das partículas (COURY, 1983).

2.8 Porosidade do meio filtrante

A porosidade do meio filtrante (ε) é um parâmetro que corresponde à relação de vazios presentes no meio e pode ser obtida por meio da equação proposta por Ergun (1952), muito aplicada para leitos granulares com porosidade entre 0,1 e 0,75 e para partículas com diâmetros entre 10^2 e 10^4 μm e número de Reynolds de partículas maiores que a unidade. No

entanto, para partículas muito pequenas (1 a 10 μm) e número de Reynolds da ordem de 10^{-2} , a equação também pode ser utilizada (SILVA NETO, 2002; RODRIGUES, 2006):

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

Entretanto, a porosidade do meio filtrante pode ser obtida experimentalmente, aplicando o método proposto por Aguiar e Coury (1996). Este método consistiu na preparação de amostras dos meios filtrantes para serem observadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Assim, a porosidade experimental pode ser obtida aplicando a seguinte equação (RODRIGUES, 2006):

$$\varepsilon_{\text{exp}} = \frac{A_t - A_f}{A_t} \quad (23)$$

em que ε_{exp} é a porosidade superficial do meio filtrante, A_t é a área total da imagem e A_f é a área das fibras.

2.9 Velocidade de filtração

A velocidade de filtração influencia diretamente no tempo de filtração, na queda de pressão residual e no desgaste do meio filtrante. Altas velocidades de filtração promovem menores tempos de filtração e intensas penetrações de partículas no filtro fibroso. Isso dificulta a remoção da torta e aumenta a queda de pressão, o que ocasiona maior desgaste do meio filtrante. Por outro lado, uma alta velocidade de filtração faz com que uma menor área de filtração seja necessária, reduzindo custos. Entretanto, baixas velocidades de filtração facilitam a remoção da torta devido à menor interação entre as partículas e o filtro fibroso, porém implicam maior consumo de energia (DONOVAN, 1985; SALEEM et al., 2012; LEE et al., 2015).

Geralmente, a velocidade de filtração (velocidade superficial) utilizada é baixa e o número de Reynolds é pequeno ($\text{Re} < 1$), podendo ser aplicada a lei de Darcy para descrever o fluxo de gás através dos filtros fibrosos e a torta, e para calcular quedas de pressão individuais (AGUIAR, 1991; SALEEM et al., 2012):

$$\Delta P_M = \frac{1}{B_M} \mu L v_s \quad (24)$$

e

$$\Delta P_C = \frac{1}{B_C} \mu L_C v_s \quad (25)$$

em que L e L_C são as espessuras do meio filtrante e da torta, respectivamente, B_M e B_C são as permeabilidades de regeneração do meio filtrante e da torta, respectivamente.

No entanto, B_C depende da espessura e da massa da torta de filtração, que pode ser calculado aplicando o balanço de massa a qualquer tempo t_f :

$$L_C \rho_p (1 - \varepsilon_C) A_f = c v_s t_f S_e A_f = w A_f \quad (26)$$

onde c é concentração de pó, S_e é a eficiência total de separação, ε_C é a porosidade da torta e w é a massa da torta por unidade de área.

Combinando as equações (1) e (26), tem-se:

$$\Delta P = \frac{\mu}{B_M} L v_s + \frac{\mu}{B_C} \frac{w}{\rho_p (1 - \varepsilon_C)} v_s \quad (27)$$

ou

$$\Delta P = k_M \mu v_s + k_C \mu w v_s \quad (28)$$

em que $k_M = L/B_M$ é a resistência do meio filtrante (m^{-1}) e $k_C = 1/B_C \rho_p (1 - \varepsilon_C)$ é a resistência específica da torta (m/kg) (SALEEM et al., 2012).

A equação (28) é comumente utilizada para descrever a queda de pressão do filtro (LÖFFLER et al., 1988).

Alguns trabalhos encontrados na literatura científica referem-se à influência da velocidade de filtrante durante o processo, sendo que, o que se observa é o aumento da queda de pressão em função do aumento da velocidade de filtração (DAVIS e KIM, 1999). Saleem et al. (2012) comenta que é evidente que a queda de pressão aumenta à medida que a velocidade de filtração aumenta. Lee et al. (2015) também observaram que a queda de pressão aumentou linearmente com a velocidade de filtração sob todas as condições de temperatura e pressão analisadas. Cheng e Tsai (1998) verificaram que, à medida que ocorre o aumento da velocidade de filtração (de 1 a 9 cm/s) ou a redução do tamanho da partícula, maior é a resistência específica da torta. Koch e Krammer (2016) comentam que a distribuição da velocidade do gás tem efeito sobre o comportamento de alojamento de pó no filtro. Silva et al. (1999) observaram a influência da velocidade superficial de filtração na formação e na remoção da torta. Verificou-se que o aumento da velocidade superficial de filtração, proporcionou uma redução na porosidade da torta e um aumento na resistência específica da

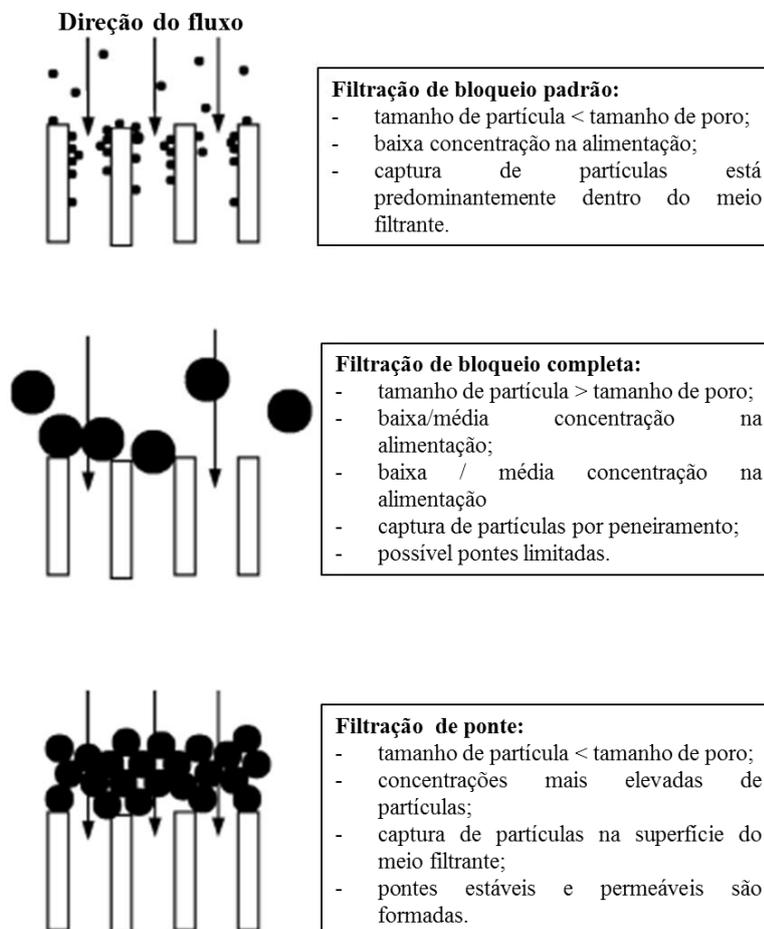
torta e no tamanho médio das partículas, devido à sedimentação das partículas antes de atingir o meio filtrante.

2.10 Deposição de partículas no meio filtrante

A deposição de partículas em meios filtrantes é uma consequência que pode ocorrer em maior ou menor grau, dependendo das características dos materiais utilizados e condições operacionais (RODRIGUES, 2006).

Os meios filtrantes coletam as partículas de duas formas principais (Seção 2.1). Quando as partículas são maiores do que os poros do meio filtrante e formam um depósito na superfície do meio (torta de filtração), e quando as partículas são menores do que os poros do meio e formam deposições dentro da estrutura interna do meio filtrante. Este processo de separação se refere à filtração de profundidade devido à acumulação gradual das partículas no meio filtrante, conforme ilustrado na Figura 10 (WAKEMAN, 2007).

Figura 10 – Mecanismos de filtração.



Fonte: Adaptado de Wakeman, 2007.

Um estudo aprofundado sobre a deposição em filtros fibrosos limpos é essencial devido ser um dos aspectos mais importantes relacionados ao desempenho dos meios filtrantes. No entanto, poucos estudos têm sido dedicados à penetração de meios filtrantes carregados de partículas (BAO et al., 2015).

Schmidt e Löffler (1990, 1991) desenvolveram um método para congelar a estrutura da torta. Schmidt (1995, 1997) observou que a porosidade da torta diminuiu com o aumento da queda de pressão e, portanto, propôs um programa de simulação baseado em um modelo simples, pelo qual as porosidades transitórias locais dentro da torta e a queda de pressão em função do tempo podem ser calculadas.

Aguiar e Coury (1996) propuseram um método experimental para determinar a porosidade da torta, baseado na análise de imagens de seções transversais da torta. Os resultados mostraram que a porosidade da torta aumentou consideravelmente com a diminuição do diâmetro de partícula. Assim como depende da espessura e da posição da torta, indicando camadas de pó compressíveis.

Thomas et al. (2001) descreveram o efeito das partículas em dois estágios. No primeiro estágio observou o aumento da queda de pressão e da eficiência do meio filtrante, até a formação da torta. Já no segundo estágio observou que o aumento da taxa de eficiência foi mais lento. No entanto, a maior penetração foi obtida nos ensaios de maior tempo de duração, sob a mesma concentração de entrada de pó.

Martins (2001) estudou os efeitos da velocidade de filtração sobre a penetração das partículas e verificou que para a velocidade de filtração de 10 cm/s, houve maior retenção de partículas no meio filtrante, assim como maior profundidade de penetração e queda de pressão residual, em relação aos ensaios realizados com velocidades de filtração em 5 cm/s.

Tanabe et al. (2011) investigaram a deposição e a remoção de partículas durante a filtração e limpeza por fluxo de ar reverso, e observaram que a profundidade de deposição de partículas no filtro de polipropileno foi menor do em relação aos filtros de poliéster e de acrílico analisados. Entretanto, o filtro de polipropileno apresentou a queda de pressão residual no início dos testes de filtração mais elevada em relação aos demais filtros investigados, devido à maior acumulação de partículas na superfície do filtro.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS ADOTADOS NA OPERAÇÃO DE FILTRAÇÃO DE GASES

Este capítulo apresenta a descrição dos materiais utilizados nos testes experimentais, a metodologia empregada para obtenção dos resultados e as unidades experimentais utilizadas, mostrando de forma detalhada cada componente.

3.1 Materiais

3.1.1 Material particulado

O material particulado utilizado foi o calcário dolomítico. A caracterização deste material foi realizada no Laboratório de Controle Ambiental I, do Departamento de Engenharia Química, da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Obteve-se a massa específica da partícula, o diâmetro médio volumétrico, a massa e a concentração de partícula em função do diâmetro aerodinâmico e a circularidade média das partículas.

Os testes de caracterização foram realizados em triplicatas. A massa específica da partícula foi obtida em testes de Picnometria à Hélio (*AccuPyc 1330, Micrometrics*). O diâmetro médio volumétrico por meio do equipamento *Malvern Mastersizer Microplus*. A massa e a concentração de partícula em função do diâmetro aerodinâmico foram obtidas pelo contador de partículas APS acoplado ao gerador (*Small Scale Powder Disperser 3433, TSI*). A circularidade média das partículas foi determinada pela imagem em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), do material particulado seco em estufa à 70°C por 24 horas, e com o auxílio do programa de análise de imagem *Image Pro Plus 7.0*.

3.1.2 Meios filtrantes

Os meios filtrantes empregados foram de diferentes fibras e tratamentos de superfície. Nos capítulos 4, 5, 6 e 7 adotaram-se diferentes filtros fibrosos, de acordo com a necessidade de cada investigação. Na investigação dos parâmetros operacionais de limpeza foi utilizado o meio filtrante de fibras de acrílico, com tratamento de superfície, calandrado e chamuscado (Capítulo 4).

Para a avaliação da influência do tratamento de superfície, adotaram-se os filtros fibrosos de poliéster, sem tratamento e com o tratamento na superfície. Os tratamentos aplicados nos filtros foram o chamuscado/calandrado e calandrado/termofixado, com acabamento de anti-pilling (face lisa) tipo Egg-Shell em uma das faces (Capítulo 5). No Capítulo 6 utilizou-se o filtro fibroso de poliéster calandrado/termofixado aplicado no Capítulo 5 para verificar a influência da queda de pressão. No estudo da deposição das partículas foram utilizados os filtros fibrosos de poliéster e de polipropileno com PTFE, submetidos ao mesmo tratamento físico de superfície, calandrado/termofixado com acabamento de anti-pilling (face lisa) tipo Egg-Shell em uma das faces (Capítulo 7).

Para as caracterizações dos meios filtrantes foram obtidas imagens de três regiões, na superfície e na transversal, por Microscopia Eletrônica de Varredura (*Philips XL-30 FEG*), no Laboratório de Caracterização Estrutural, da UFSCar.

As imagens obtidas no MEV-FEG foram analisadas manualmente no programa de análise de imagens *Image Pro Plus 7.0*, calibrando a imagem com o auxílio da ferramenta do programa *Spatial Calibration*, de acordo com a escala fornecida por cada imagem.

As imagens das superfícies dos meios filtrantes foram utilizadas na determinação do diâmetro médio das fibras e as imagens da transversal foram para a determinação da espessura dos filtros fibrosos. Para tal finalidade, foram tiradas três imagens da superfície e da transversal dos filtros fibrosos, obtendo-se as triplicatas de cada amostra investigada.

Assim, em cada imagem da transversal foram traçadas linhas retas posicionadas sobre o filtro fibroso avaliado, com o auxílio da ferramenta do programa de análise de imagem *Manual Measurement* e cada linha traçada correspondeu a um valor de espessura. Estes valores obtidos foram inseridos no programa *Microsoft Excel* e assim foram calculadas as médias das espessuras. Também com o auxílio do programa *Microsoft Excel* foram calculadas as médias dos diâmetros das fibras de cada amostra analisada. Este procedimento utilizado foi baseado no trabalho de Barros, 2014.

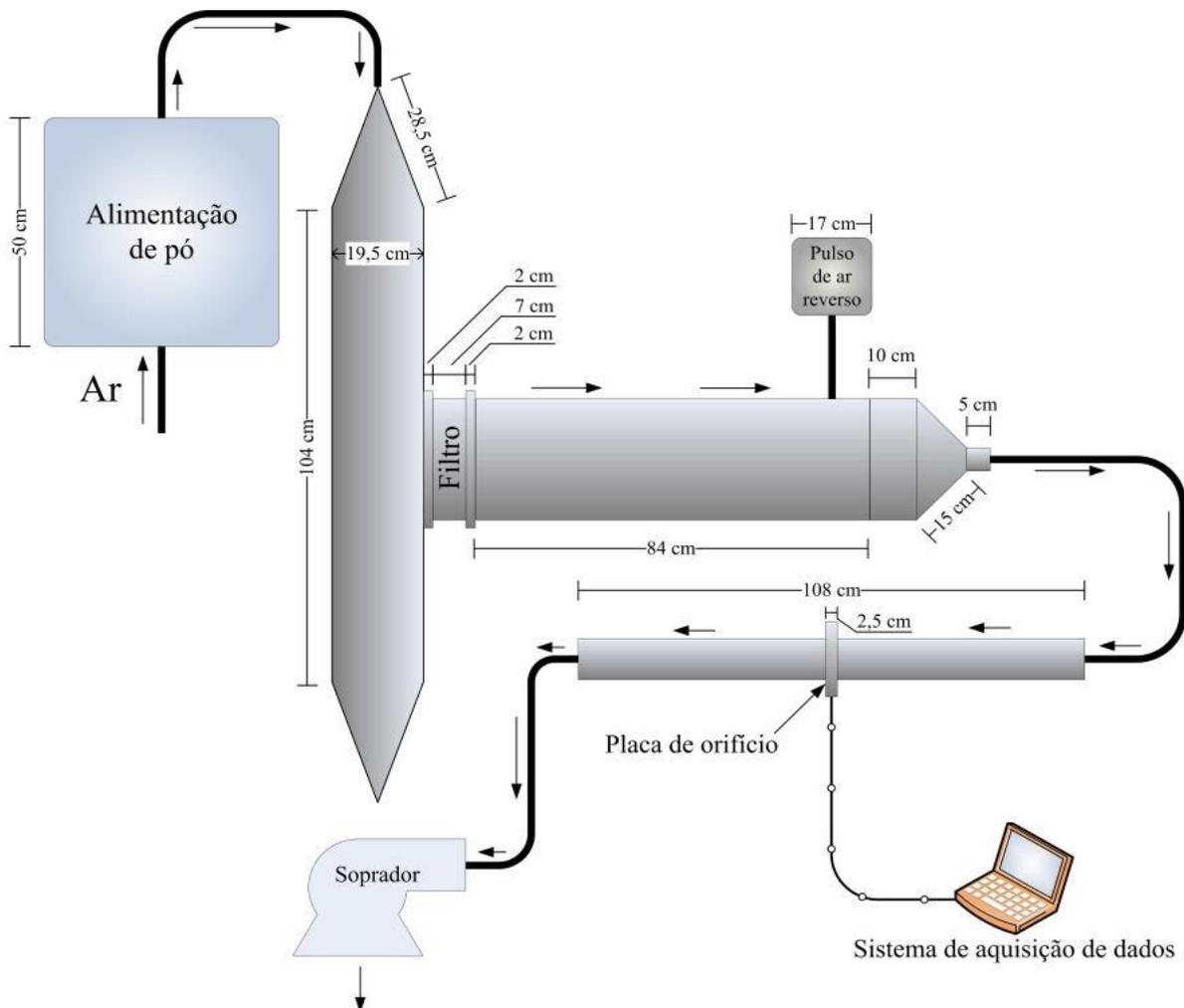
A rugosidade da superfície total dos meios filtrantes foi determinada por meio das imagens em Microscopia Ótica Confocal (*OLS 4100 da Marca Lext*), obtidas no Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar e com o auxílio do programa de análise de imagens do computador do próprio microscópio.

3.2 Unidade experimental de filtração

O experimento foi conduzido no equipamento de filtração de gases com limpeza por pulso de ar reverso (*pulse-jet cleaning*), construído com base nas normas VDI 3926, no Laboratório de Controle Ambiental I, do Departamento de Engenharia Química da UFSCar.

Na Figura 11 está apresentada a unidade experimental utilizada nos testes de filtrações. Este equipamento apresenta uma área filtrante de 227 cm^2 e é constituído por um alimentador de partículas, um suporte para o meio filtrante, um sistema de limpeza por pulso de ar, medidores de vazão tipo orifício e um sistema de aquisição de dados (CIRQUEIRA et al, 2017).

Figura 11 – Unidade experimental de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

Durante a operação de filtração, o valor de queda de pressão foi pré-estabelecido para cada ciclo de filtração e a velocidade superficial de filtração foi mantida constante em 4 cm/s . Durante a limpeza do meio filtrante, utilizou-se o tempo de pulso e a pressão do pulso controlada por um manômetro, para o desprendimento da camada de material particulado

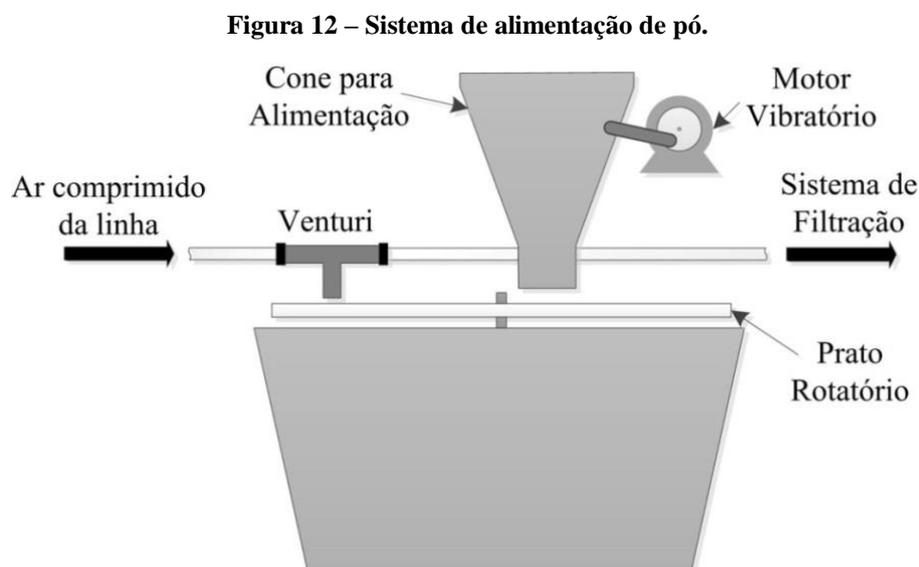
formada. O sistema de aquisição de dados permitiu o registro da queda de pressão em função do tempo. De acordo com os objetivos das etapas investigadas nos Capítulos 4, 5, 6 e 7, diferentes valores de tempo de pulso e de pressão do pulso foram utilizados.

O ar comprimido utilizado foi proveniente da linha de ar comprimido do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Por isso, antes do ar comprimido entrar na caixa do alimentador de partículas, este passava por dois desumidificadores contendo sílica, removendo assim, a umidade do ar. Os valores de umidade e de temperatura foram controlados para evitar influência nos resultados de filtração.

3.2.1 Alimentador de partículas

O alimentador de pó foi construído utilizando um disco giratório com um sulco circular, adaptado a um cone utilizado como reservatório de pó. Um motor foi alocado junto ao cone para sua vibração e para o preenchimento uniforme do sulco. A velocidade de rotação foi ajustada por meio de um controlador, em porcentagem (%) da velocidade máxima, garantindo uma rotação fixa em 40% do prato, que fornece a vazão mássica de pó de $0,11 \pm 0,007$ g/s (calibração do pó de entrada) e de $0,04 \pm 0,002$ g/s (calibração do pó que chega ao filtro).

As partículas entram na corrente de ar com o auxílio de um Venturi. A saída de baixa pressão era colocada por cima do sulco preenchido com as partículas, sugando o pó para a corrente gasosa. O conjunto descrito foi isolado em uma caixa vedada, de modo que, a umidade da corrente gasosa fosse controlada. Na Figura 12 está apresentado o detalhamento do sistema de alimentação de pó.



Fonte: Acervo pessoal.

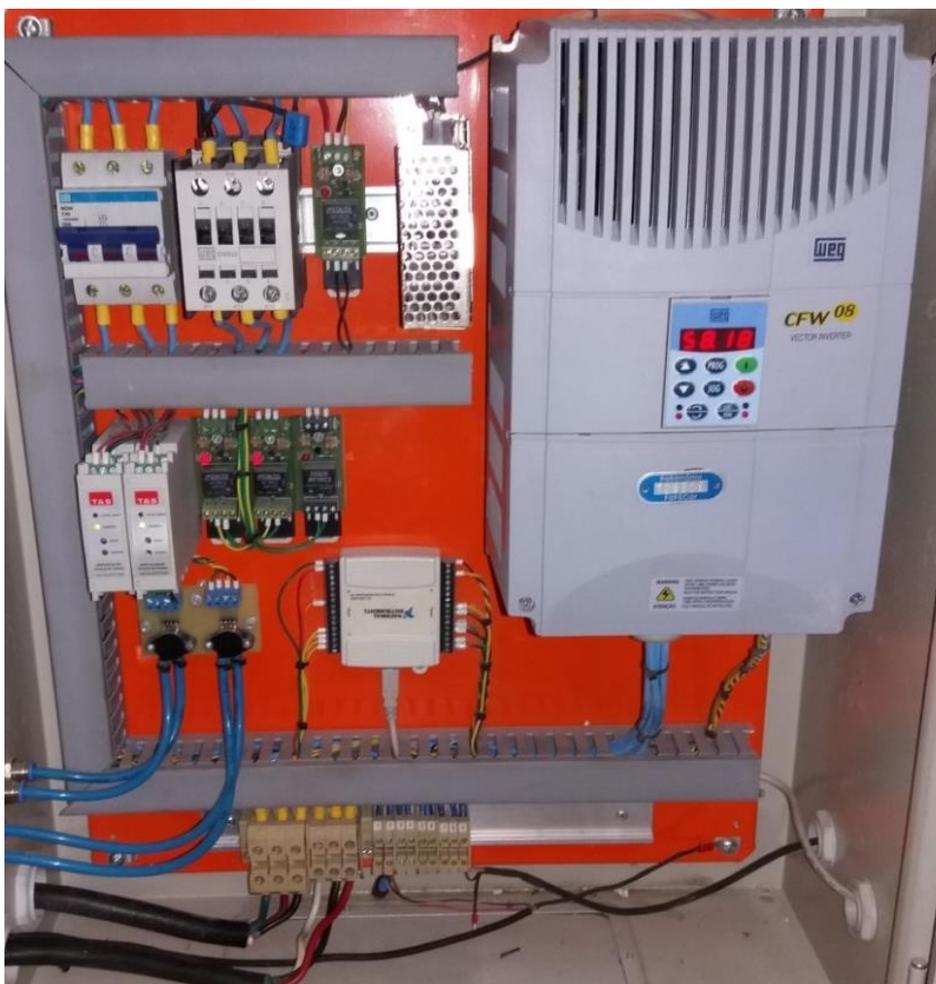
3.2.2 Aquisição de dados

Os testes de filtrações foram monitorados por um sistema de aquisição de dados on-line, que permitia a análise dos parâmetros como a queda de pressão no meio filtrante, a velocidade superficial de filtração, o tempo de operação transcorrido e o tempo de pulso aplicado na limpeza.

O hardware e o software que controlava o experimento e realizava o registro das variáveis de interesse foi elaborado pela Empresa T&S Equipamentos.

Na Figura 13 está apresentado o hardware utilizado, que é um quadro de acionamento, composto por um inversor de frequência WEG CFW-08 (acionamento do motor do soprador), válvulas pneumáticas (controle do ar comprimido), outros dispositivos de proteção elétrica (disjuntor trifásico de WEG de 40 A, contator WEG CWM32, relés de 24 VDC, etc) e o microcontrolador National Instruments USB-6009.

Figura 13 – Quadro de acionamento.

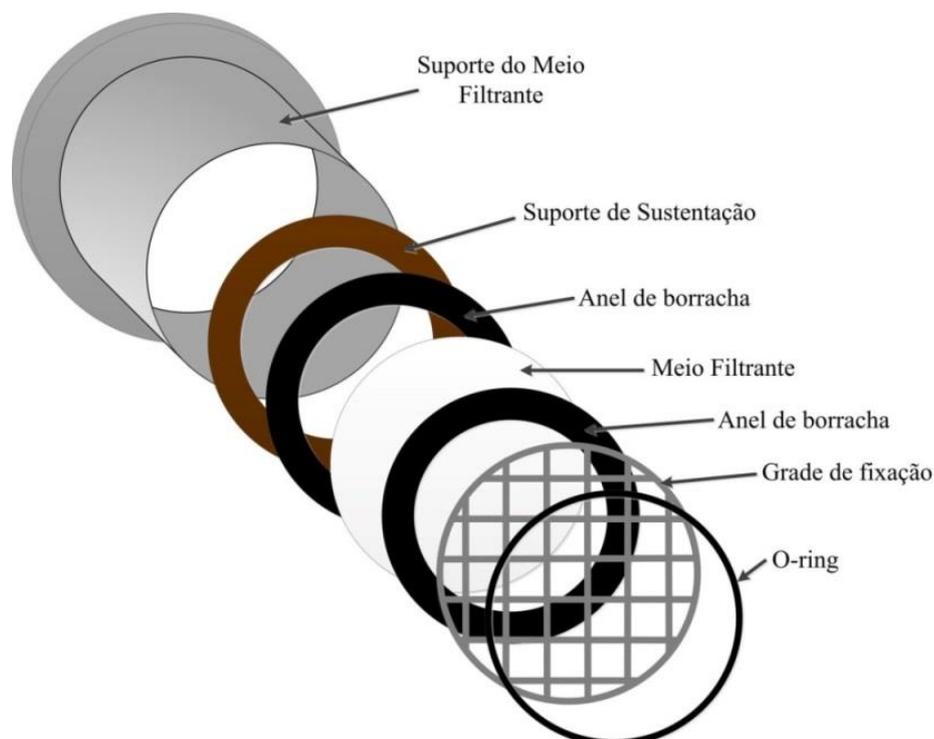


Fonte: Acervo pessoal.

3.2.3 Suporte do meio filtrante

O meio filtrante foi fixado dentro do equipamento de aço inoxidável, encaixado por um suporte de aço inoxidável contendo um suporte de sustentação, dois moldes de borracha de vedação, uma grade de fixação e um o-ring (junta seladora flexível). Na Figura 14 está apresentado um esquema do suporte utilizado no meio filtrante.

Figura 14 – Suporte do meio filtrante.



Fonte: Acervo pessoal.

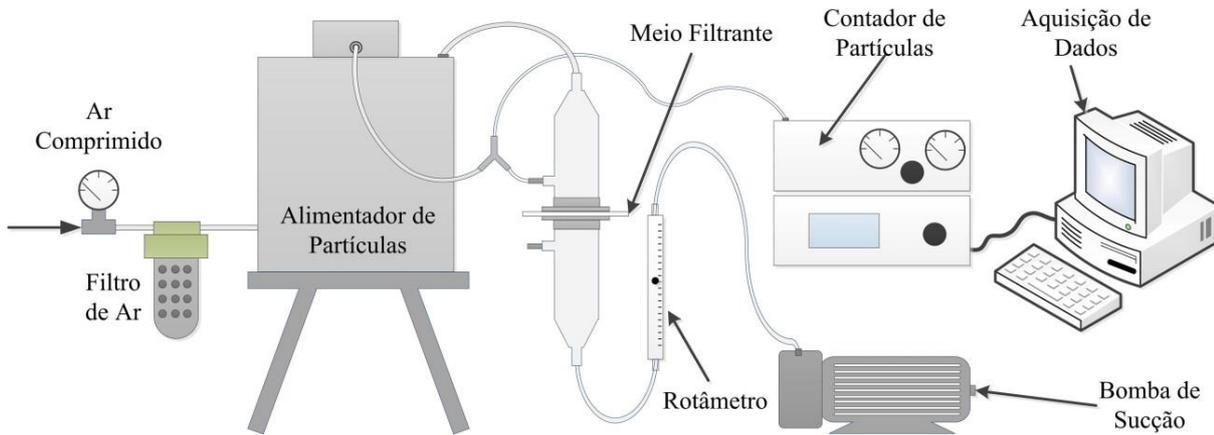
3.3 Unidade experimental de eficiência de coleta

Na Figura 15, é apresentado o equipamento utilizado para realização dos ensaios experimentais de eficiência de coleta do meio filtrante (virgem e após os ciclos de filtração), que foi composto por um gerador de partículas (*Small Scale Powder Dispenser 3433, TSI*), um suporte para o meio filtrante, um rotâmetro (*Gilmont Instruments.Inc, Flowmeter Cat. N° Size 3*), um contador de partículas APS (*Aerodynamic Particle Sizer 3320, TSI*), um filtro de ar comprimido, um computador e uma bomba de sucção.

O gerador de partículas foi utilizado para dispersar as partículas, aplicando a técnica de aspiração por um Venturi. A vazão de ar deste equipamento foi ajustada em 5 L/min e a pressão de sucção em 100 polegadas de água.

O material particulado utilizado nos testes de eficiência foi o mesmo material utilizado nos testes de filtração. Assim, o calcário dolomítico foi depositado sobre a superfície do disco giratório e com o auxílio de um pincel foi espalhado de forma uniforme.

Figura 15 – Unidade experimental de eficiência de coleta.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 16, pode ser visualizado o interior do gerador de partículas (*Small Scale Powder Dispenser*) da Marca TSI Modelo 3433, utilizado na determinação da eficiência de coleta dos meios filtrantes.

Figura 16 – Gerador de partículas (TSI 3433).



Fonte: Acervo pessoal.

O sistema de ar que foi conectado ao gerador de pó é da Marca TSI Modelo 3070. Este equipamento foi composto por um filtro de entrada, um regulador de pressão, uma coluna

dessecadora com sílica gel e um filtro de saída, que serviram para filtrar, secar e regular a pressão do ar na linha de ar comprimido, respectivamente. Além disso, o fluxo de ar foi controlado por uma bomba a vácuo.

O equipamento que realizou a contagem das partículas (APS – *Aerodynamic Particle Sizer Model 3321*) consistiu de um espectrômetro de alto desempenho, apropriado para medir com precisão a concentração e o diâmetro das partículas da corrente gasosa.

As partículas passaram por dois feixes de lasers, gerando um sinal com dois picos e o tempo entre os picos formados que forneceu as informações aerodinâmicas de tamanho de partícula. Mais informações podem ser encontradas em Rodrigues, 2005.

A contagem das partículas era realizada antes e depois do filtro, pelo contador (APS). Cada contagem da concentração das partículas que chegavam e que penetravam o meio filtrante foi adotado o tempo de amostragem de 1 minuto.

Os dados fornecidos pelo contador (APS) foram coletados pelo software, por meio de um sensor e, assim, foram arquivados. Para a análise dos dados obtidos, foi necessário converter no software os dados aplicando a correção de Stokes pelo valor de densidade da partícula utilizada durante os experimentos.

A determinação de eficiência de coleta foi realizada na mesma amostra filtrante utilizada nos ensaios de filtração. Além disso, para que as mesmas condições da filtração fossem mantidas, como a velocidade de filtração (4 cm/s), diluiu-se o ar, antes de chegar no contador de partículas, considerou-se a vazão do APS e, calibrou-se utilizando o borbulhomêtro. A velocidade de filtração foi monitorada por meio do rotâmetro (*Gilmont Instruments n°3*).

Desta forma, os ensaios foram realizados para a velocidade de filtração de 4 cm/s e as eficiências de coleta foram calculadas para cada faixa de diâmetro aerodinâmico de partículas, através da Equação 21, que relaciona a concentração das partículas antes e depois da passagem pelo meio filtrante.

3.4 Permeabilidade dos meios filtrantes

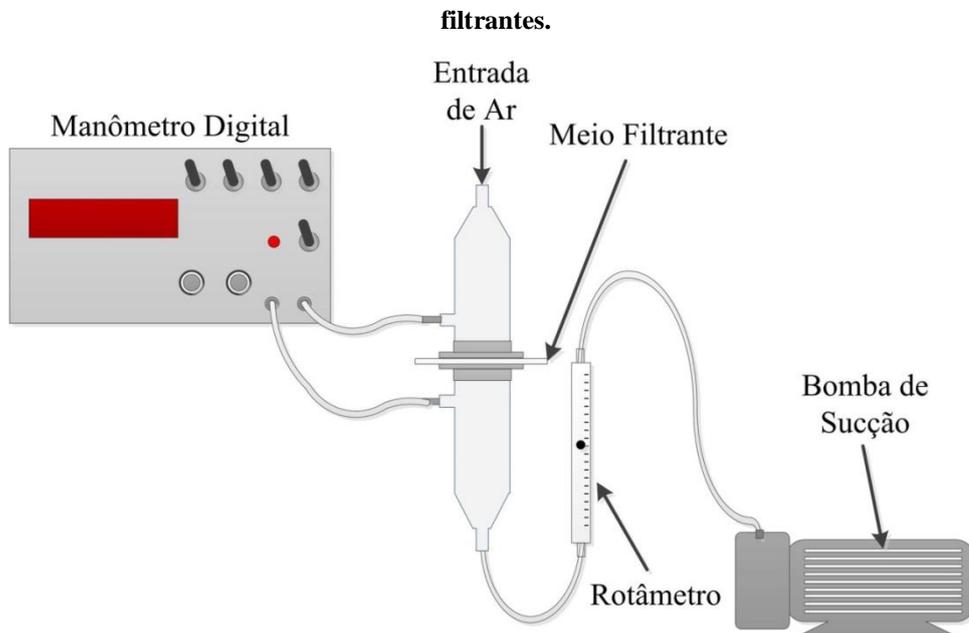
A permeabilidade do meio filtrante foi obtida por meio das medidas de queda de pressão em função da velocidade superficial do gás.

O equipamento utilizado para realização dos testes experimentais de permeabilidade foi composto por um micromanômetro digital (*Furness Controls, Modelo FC012*), um

rotâmetro (*Gilmont Instruments n°3*), um suporte para o meio filtrante e uma bomba de sucção.

Na Figura 17, é apresentada a ilustração do equipamento montado para a determinação da permeabilidade dos filtros fibrosos.

Figura 17 – Ilustração do equipamento composto para a determinação da permeabilidade dos meios filtrantes.



Fonte: Acervo pessoal.

Os ensaios de permeabilidade foram realizados colocando a amostra do filtro fibroso sobre o suporte de filtração. Imediatamente, media-se a temperatura e umidade do ar e, o manômetro digital era então ligado e ajustado na posição 0,00 mm c.a. Desta forma, ligava-se a bomba a vácuo e iniciava-se o ajuste da velocidade de filtração no rotâmetro. Em cada velocidade de filtração avaliada, anotava-se então a medida de queda de pressão no filtro, que era registrada no manômetro digital. Esse procedimento foi repetido três vezes para cada amostra de filtro fibroso.

Assim, a permeabilidade do meio poroso foi estimada através da Equação de Darcy (Equação 19). Esta equação considera o escoamento de fluidos em meios porosos (baixas velocidades), relativamente aos valores de queda de pressão e a velocidade superficial.

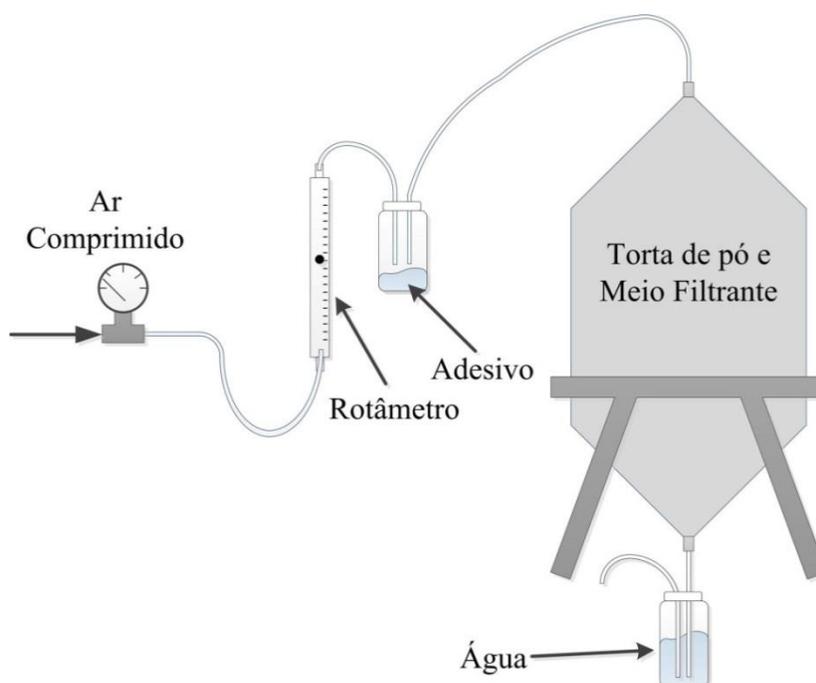
3.5 Deposição das partículas no filtro fibroso

As deposições das partículas no meio filtrante foram determinadas experimentalmente, por meio do procedimento proposto por Aguiar e Coury (1996) de preparação de amostras dos meios filtrantes para serem analisados no MEV. Este procedimento foi constituído pelas

etapas de pré-endurecimento, de embutimento, de seccionamento, de esmerilamento e de polimento. No entanto, na etapa de embutimento foi necessária a realização de uma modificação no procedimento, por meio da aplicação de um catalisador na resina PMS10, proporcionando assim, uma redução do tempo de preparação das amostras.

Na Figura 18, é apresentado o equipamento utilizado no pré-endurecimento das amostras de filtros fibrosos, que é constituído por duas seções cilíndricas de ferro, um rotâmetro, um depósito para cola adesiva, um depósito de água e um sistema de ar comprimido.

Figura 18 – Equipamento de pré-endurecimento dos meios filtrantes.



Fonte: Acervo pessoal.

As seções cilíndricas de ferro onde foi colocado o meio filtrante são compostas por um suporte de arame para a sustentação da amostra e uma borracha para a vedação do sistema.

A vazão de ar foi mantida constante em 0,5 L/min pelo rotâmetro, enquanto o vapor do adesivo foi arrastado pelo fluxo de ar, através do meio filtrante, na velocidade do gás em 0,1 cm/s, por 36 horas até impregnação total do adesivo na amostra, aplicando-se duas gotas de adesivo a cada hora.

Após o pré-endurecimento, separou-se um recipiente redondo e uma esponja de 0,5 mm de espessura de mesma área da amostra pré-endurecida. Neste recipiente foi colocada uma resina Henkel PMS-10, fornecida pela LOCTITE do Brasil, de forma que todo fundo do recipiente ficasse preenchido, também foi adicionado 10 gotas de catalisador da Marca Arotec

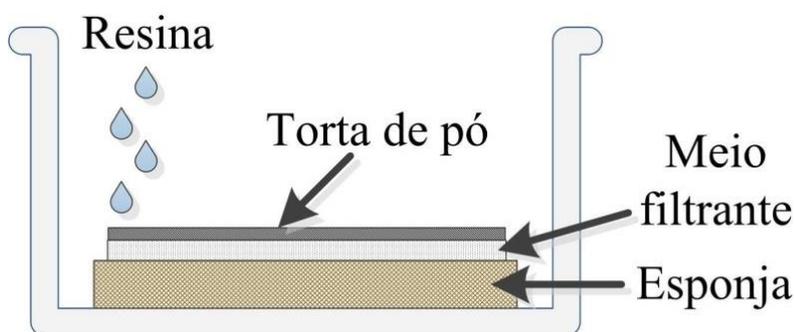
(líquido auto-polimerizante – P2). Em seguida, colocou-se a esponja e a amostra do meio filtrante, até que esta ficasse completamente encharcada.

A amostra encharcada foi colocada sobre uma placa de vidro e foi levada a uma estufa a 70°C para curar a resina.

A temperatura da estufa e a quantidade de gotas de catalisador ideal para curar a resina apresentadas anteriormente foram verificadas por meio da combinação de vários testes experimentais no Laboratório de Controle Ambiental I da UFSCar. Durante estes testes, aplicou-se 1 a 10 gotas de catalisador da Marca Arotec em amostras de meios filtrantes contendo a resina Henkel PMS-10, que foram submetidas a temperaturas da estufa entre 60 a 70°C. Entretanto, a melhor combinação investigada correspondeu a 10 gotas de catalisador em 70°C.

Na Figura 19 está apresentada a vista do procedimento de endurecimento da amostra.

Figura 19 – Vista do procedimento de endurecimento da amostra.



Fonte: Acervo pessoal.

A amostra endurecida em 48 horas foi seccionada em pedaços quadrados de 1 cm² de área, utilizando uma serra fita de bancada. Estas amostras foram embutidas em moldes cilíndricos de PVC aplicando-se silicone para uma melhor aderência da amostra na placa de vidro e evitar o vazamento da resina líquida, e vaselina para facilitar a remoção das amostras dos moldes depois de totalmente secas. Como suporte dos moldes, utilizou-se uma placa de vidro toda revestida por uma camada de papel filme.

O embutimento foi realizado aplicando-se, dentro dos moldes contendo a amostra do meio filtrante no centro, a resina Du Gel da Marca Du Latéx e o catalisador da mesma marca da resina, deixando curar por 24 horas à temperatura ambiente. A amostra de meio filtrante embutida pode ser visualizada na Figura 20.

Figura 20 – Amostras embutidas do meio filtrante.

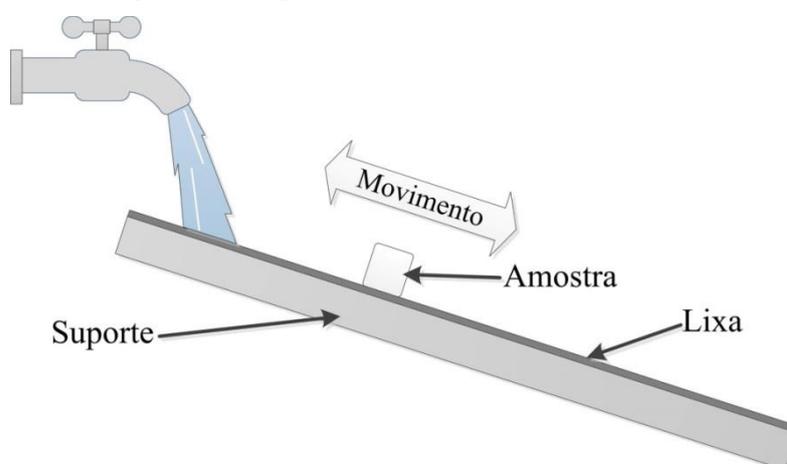


Fonte: Acervo pessoal.

A amostra embutida foi submetida ao esmerilamento, que consistiu em lixar as amostras a úmido, em lixas de carbeto de silício na sequência de 320, 600, 1200 e 2000 mesh.

O esquema do procedimento de esmerilamento da amostra pode ser visualizado na Figura 21, que é composto por uma lixadeira manual, construída em uma caixa metálica de alumínio, contendo pistas para tiras de lixas abrasivas separadas por grade em acrílico, um tubo pingador com mangueira, um vidro inclinado e duas barras pressionadoras que asseguram que as lixas fiquem fixas e não se rompam.

Figura 21 – Esquema do esmerilamento da amostra.

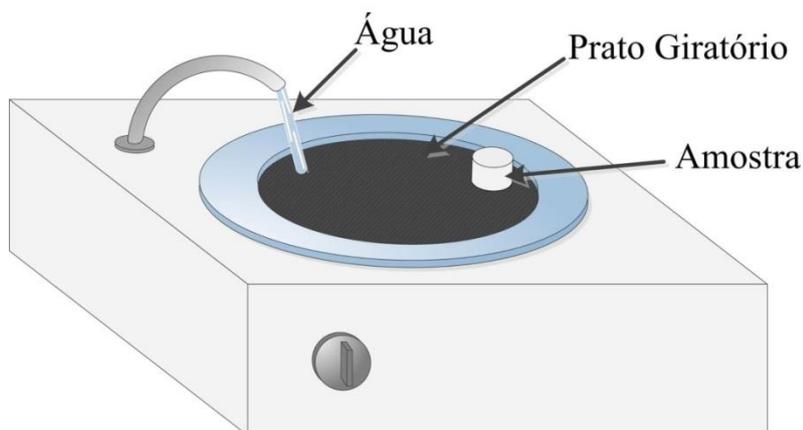


Fonte: Acervo pessoal.

Depois de esmeriladas, as amostras foram polidas, utilizando-se uma politriz, contendo um tecido de veludo, um sistema de irrigação com controle de vazão e uma suspensão de alumina de 1 μm .

O procedimento de polimento pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – Esquema do polimento da amostra.



Fonte: Acervo pessoal.

As etapas de esmerilamento e de polimento foram realizadas no Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar.

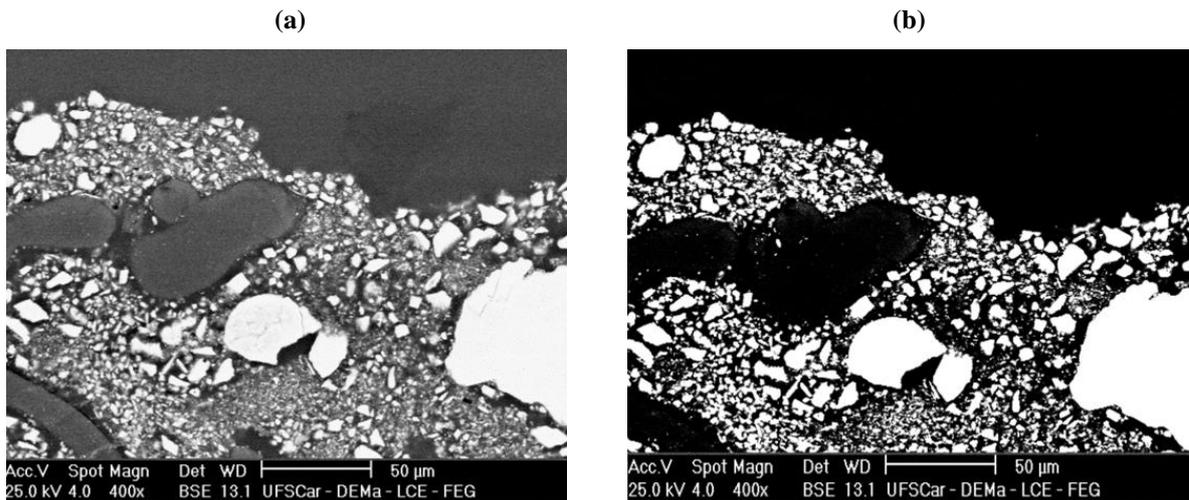
A amostra polida foi submetida à metalização com ouro no Laboratório de Caracterização Estrutural da UFSCar. Também neste laboratório, foram obtidas as imagens em MEV das amostras preparadas pelo procedimento descrito anteriormente.

Posteriormente, as imagens obtidas em MEV foram processadas em um analisador de imagens (*Image Pro Plus 7.0*) no Laboratório de Controle Ambiental I, do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. Este processamento era realizado binarizando-se as imagens, a fim de se obter um melhor contraste entre as partículas e o restante da amostra, proporcionando maior confiança na determinação da contagem do número de partículas, da profundidade de deposição e do tamanho das partículas depositadas, realizada automaticamente pelo software em cada faixa fotografada. Mais informações podem ser encontradas em Martins, 2001; Rodrigues, 2006; Tanabe et al. 2011.

Na Figura 23 é ilustrado um exemplo de microfotografia (a) original e (b) binarizada pelo software.

Os resultados de deposição de partículas no meio filtrante foram obtidos por meio de perfis de fotografias sequenciais do comprimento da superfície torta-ar até a profundidade. Na Figura 24 está apresentada uma ilustração deste processo, envolvendo as cinco primeiras fotos.

Figura 23 – Comparação entre (a) a microfotografia da foto original e (b) a binarizada pelo software.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 24 – Imagem da profundidade de deposição de partículas no meio filtrante.



Fonte: Acervo pessoal.

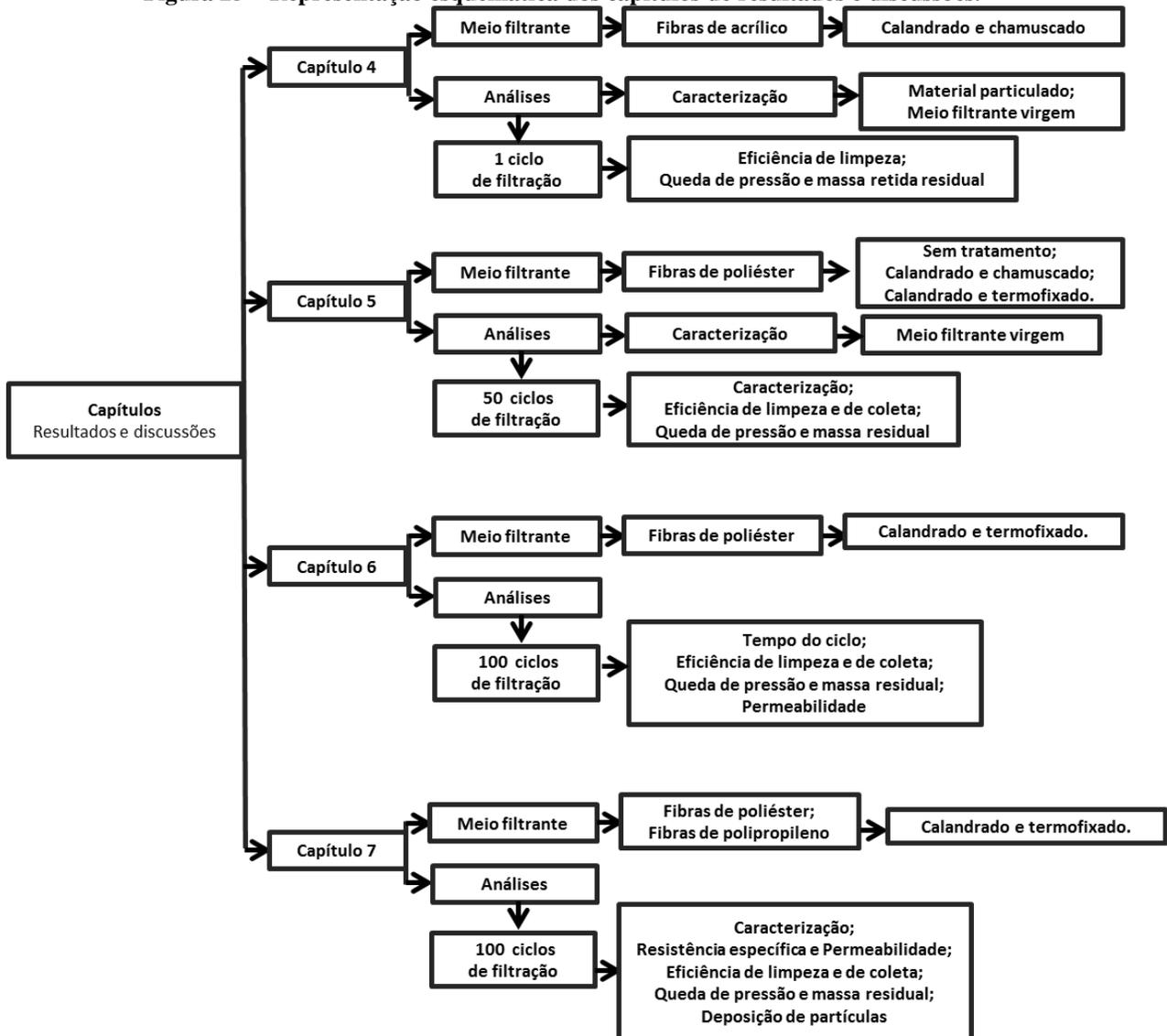
Nos capítulos seguintes, serão apresentados os resultados e discussões deste trabalho. Na Figura 25 estão indicados, resumidamente, os meios filtrantes utilizados e as análises que foram realizadas em cada capítulo de resultados e discussões. No Capítulo 4 foi utilizado o meio filtrante de fibras de acrílico, calandrado e chamuscado. As análises realizadas foram à caracterização do meio filtrante virgem e material particulado, a eficiência de limpeza do meio filtrante, a queda de pressão residual e a massa retida após 1 ciclo de filtração.

No Capítulo 5, foram utilizados os meios filtrantes de fibras de poliéster, sem e com tratamento de superfície. Neste capítulo, foram realizados 50 ciclos de filtração e foram caracterizados os meios filtrantes virgens e depois de submetidos a 50 ciclos de filtração e, foram observadas as eficiências de limpeza e de coleta, a queda de pressão residual e a massa retida após a limpeza.

No Capítulo 6, foram realizados 100 ciclos de filtração, utilizando o meio filtrante de poliéster calandrado e termofixado. Nesta etapa, o tempo do ciclo, a eficiência de coleta e de limpeza, a queda de pressão residual, a massa retida e a permeabilidade do meio filtrante foram analisados.

No Capítulo 7, foram utilizados meios filtrantes de fibras de poliéster e de polipropileno, calandrado e termofixado, em 100 ciclos de filtrações. Neste capítulo, caracterizaram-se e verificaram-se os meios filtrantes em relação à resistência específica, permeabilidade, eficiência de coleta e de limpeza, queda de pressão residual, massa retida e deposição de partículas após as sucessivas regenerações dos meios filtrantes.

Figura 25 – Representação esquemática dos capítulos de resultados e discussões.



Fonte: Acervo pessoal.

CAPÍTULO 4 - INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE LIMPEZA

Neste capítulo será apresentada uma análise sobre a influência dos parâmetros operacionais de limpeza, como a pressão e o tempo do pulso, uma vez que, o resultado da filtração depende dos parâmetros operacionais adotados.

4.1 Introdução

A operação de filtração está associada a uma maior eficiência de coleta, devido à formação da torta e, ao aumento da queda de pressão. Por isso, os filtros fibrosos necessitam ser regenerados periodicamente, geralmente por limpeza por pulso de ar reverso (MUKHOPADHYAY e PANDIT, 2014). A limpeza do meio poroso é uma das etapas mais importantes na operação dos filtros, devido possibilitar o acréscimo da queda de pressão residual se a limpeza for inadequada. Porém, se tratando de uma limpeza muito vigorosa ocasiona danificações no meio filtrante, reduzindo o tempo de vida útil do mesmo (CERON, 2012).

Assim, o sucesso na operação de filtração depende da interação de quatro variáveis de projeto: a queda de pressão, a velocidade de filtração, o meio filtrante e a técnica de limpeza (TIENI, 2005 apud SEVILLE, 1997).

No entanto, grande parte dos trabalhos encontrados na literatura sobre a filtração por pulso de ar reverso refere-se à análise dos parâmetros operacionais e o desempenho do equipamento, como no caso de Saleem and Krammer (2007), Saleem et al. (2012), Cuiping et al. (2013), Qian et al. (2014), Simon et al. (2014), Lee et al. (2015) e Mukhopadhyay et al. (2015). Porém, pouco se sabe sobre os parâmetros operacionais aplicados a limpeza por pulso de ar reverso.

Dentro deste contexto, esse capítulo tem por objetivo verificar a influência dos parâmetros operacionais de limpeza na eficiência de limpeza do filtro fibroso nos estágios iniciais de filtração, como o tempo e a pressão do pulso. Além de avaliar os valores operacionais de limpeza mais adequados para a realização dos testes de filtração na unidade experimental apresentada na Seção 3.3 (Capítulo 3).

4.2 Materiais e métodos

Nesta seção, serão apresentados os materiais utilizados e o procedimento experimental sobre os testes de filtrações mostrando as designações dos parâmetros operacionais utilizados nestes testes.

4.2.1 *Materiais*

O material particulado utilizado foi o calcário dolomítico. Este material foi caracterizado, conforme descrito no Capítulo 3 (Seção 3.1.1), e obteve-se a massa específica da partícula (Picnometria a gás Hélio), o diâmetro médio volumétrico (Malvern Mastersizer Microplus), a circularidade média das partículas (MEV FEG- Philips XL-30 e programa de Image Pro Plus 7.0) e massa e a concentração de partícula em função do diâmetro aerodinâmico.

O meio filtrante utilizado foi de fibras de acrílico com o tratamento na superfície, calandrado e chamuscado em uma das faces. A caracterização deste meio filtrante foi realizada a partir de imagens das superfícies obtidas no MEV-FEG. Maiores informações sobre o procedimento adotado podem ser encontradas no Capítulo 3 (Seção 3.1.2).

A escolha do material particulado baseou-se na sua grande aplicação, uma vez que, é muito utilizado na produção de cimento, na produção de cal (CaO), na correção de pH do solo para a agricultura, na fabricação de vidro e na adubação química. Entretanto, a escolha do meio filtrante de fibras de acrílico também foi baseada na grande aplicação em filtros de mangas e na quantidade de material disponível no Laboratório de Controle Ambiental I do Departamento de Engenharia Química da UFSCar para o início das investigações experimentais.

4.2.2 *Procedimento experimental*

Na investigação dos parâmetros operacionais de limpeza foi realizado um ciclo de filtração e foi observada a regeneração do filtro fibroso de acrílico na coleta de partículas de calcário dolomítico, por meio do sistema de aquisição de dados que permitiu o registro da queda de pressão em função do tempo.

No instante que a queda de pressão atingia o máximo valor previsto ($\Delta P_{\text{máx}}$) de 100 Pa, um pulso de ar foi ativado em um tempo (t_p) e uma pressão de pulso (P_p) em direção oposta ao fluxo de gás, desprendendo a torta de filtração.

Para determinação dos valores da operação de limpeza, a velocidade superficial de filtração (v_s) foi mantida constante a 4 cm/s durante os testes de filtrações (1 ciclo de filtração), dentro do valor típico utilizado em filtros de mangas (LO et al, 2010).

Entretanto, o valor de queda de pressão máxima foi utilizado para investigar o desgaste dos meios filtrantes no início da filtração, por isso, os testes experimentais foram realizados apenas para os primeiros estágios de filtração, ou seja, na deposição inicial das partículas na superfície do meio (próximo ao ponto de colmatção). Já que após a formação da torta torna-se mais fácil a remoção de partículas, sem muito desgaste das fibras.

Os ensaios experimentais foram realizados em triplicata. Assim, de acordo com cada designação de parâmetros, a amostra de filtro fibroso virgem foi submetida a uma filtração e uma limpeza por pulso de ar reverso.

Na Tabela 1 estão apresentadas as combinações dos parâmetros utilizados como variáveis de operações, a pressão do pulso, o número de testes e o tempo do pulso, aplicadas na limpeza do meio filtrante. Para cada pressão de pulso (1, 2, 3, 4 e 5 kgf/cm²) utilizou-se um tempo de pulso (200, 600 e 1000 ms).

Tabela 1 – Designação dos testes realizados.

Pressão do pulso (kgf/cm²)	Número de testes	Tempo do pulso (ms)	Tempo do pulso (ms)	Tempo do pulso (ms)
01	3	200	600	1000
02	3	200	600	1000
03	3	200	600	1000
04	3	200	600	1000
05	3	200	600	1000

Fonte: Elaborado pelo autor.

A massa do filtro fibroso limpo era obtida por pesagem em uma balança analítica. Após cada ensaio experimental (filtração/limpeza), o conjunto filtro-partículas retidas era novamente pesado para obter-se a massa retida.

Nesta etapa, obteve-se a queda de pressão residual do filtro fibroso, por meio da interface do software, que registrava a queda de pressão após a limpeza. Também foram utilizados os valores registrados pelo software de: queda de pressão no filtro e queda de pressão inicial, para a determinação da eficiência de limpeza do meio filtrante, aplicando a Equação 17.

4.3 Resultados e discussões

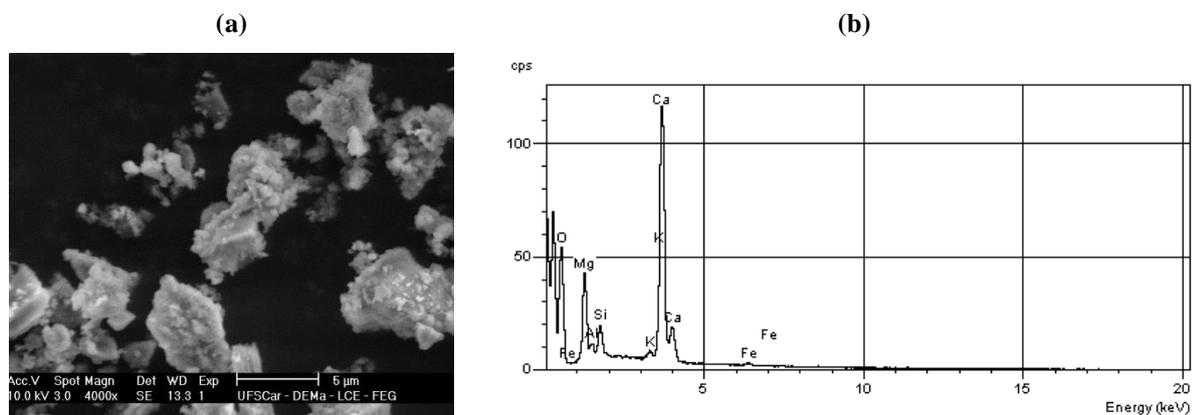
Nesta seção, será apresentada a caracterização do material particulado e do meio filtrante, os resultados e discussões sobre os testes de filtrações, quando foram investigados os parâmetros de limpeza.

4.3.1 Caracterização dos materiais

A massa específica encontrada para o calcário dolomítico foi de $2,75 (\pm 0,01) \text{ g/cm}^3$, obtida pela média de três análises (Picnometria a Hélio).

Na Figura 26 está apresentada a imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e o Espectro por Energia Dispersiva (EDS) que permitiu determinar as características morfológicas e a composição das partículas.

Figura 26 – (a) imagem obtida em MEV-FEG e (b) análise EDS do material particulado.



Fonte: Acervo pessoal.

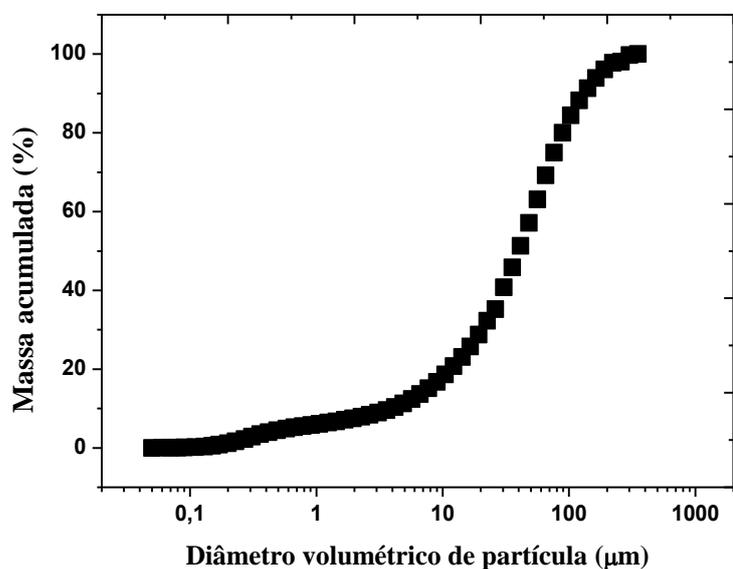
A composição química do calcário dolomítico utilizado apresentou em termos percentuais: Calcário (22,91), Oxigênio (52,81), Magnésio (5,92), Alumínio (0,93), Silício (1,72), Potássio (0,39), Cálcio (15,04) e Ferro (0,28), como observado na Figura 26 (b).

A imagem do MEV (Figura 26 a) foi binarizada com o auxílio do programa de análise de imagem *Image Pro Plus 7.0* e determinou-se a circularidade média das partículas de calcário dolomítico, que apresentou valores de $0,63 (\pm 0,08)$. Este material apresentou uma ampla faixa de tamanhos de partículas, com um diâmetro médio volumétrico de $9,60 (\pm 0,16) \mu\text{m}$.

Na Figura 27, é apresentada a distribuição granulométrica das partículas de calcário dolomítico. Além do diâmetro médio volumétrico, verificou-se a necessidade de observar a faixa de diâmetro médio aerodinâmico da partícula para a determinação da eficiência do meio filtrante.

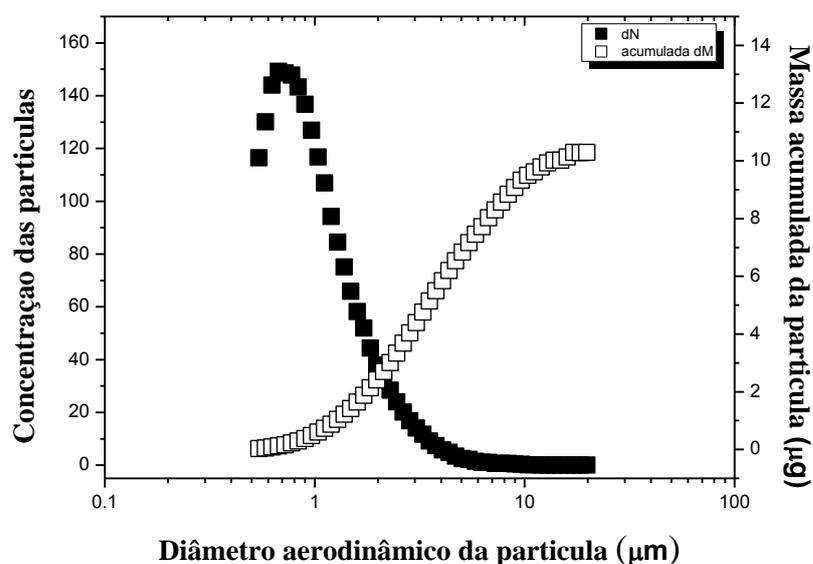
Na Figura 28 está apresentada a massa acumulada e a concentração de partículas em função do diâmetro aerodinâmico de partículas. A faixa de diâmetro aerodinâmico de partículas detectável pelo equipamento é de 0,54 a 19,81 μm . Além disso, observou-se que ocorreu o decréscimo na concentração de partículas, devido ao aumento da massa acumulada da partícula e do diâmetro aerodinâmico.

Figura 27 – Distribuição granulométrica do calcário dolomítico.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 28 – Concentração de partículas e massa acumulada em função do diâmetro aerodinâmico.

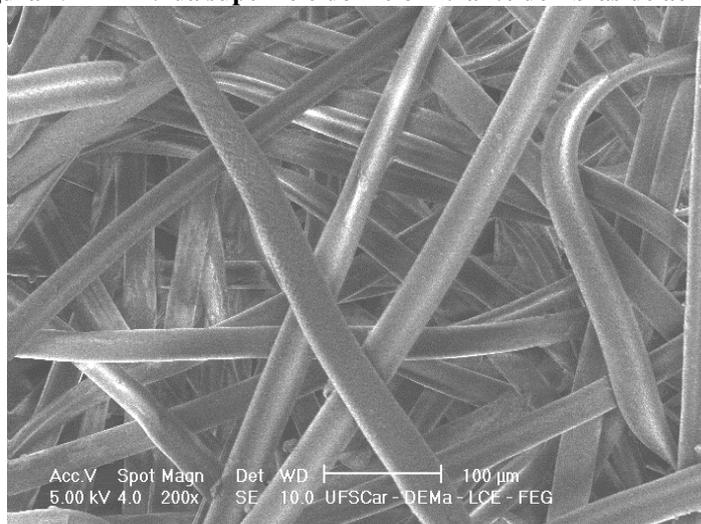


Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 29 está apresentada a imagem obtida em MEV-FEG da superfície do meio filtrante de fibras de acrílico com tratamento de superfície, chamuscagem e calandragem. Esta

imagem da superfície do meio filtrante, com ampliação de 200x, foi utilizada na determinação do diâmetro médio das fibras, conforme o procedimento descrito no Capítulo 3 (Seção 3.1.2). Estas análises foram realizadas em triplicatas e as principais características do meio filtrante analisado estão apresentadas na Tabela 2.

Figura 29 – MEV da superfície do meio filtrante de fibras de acrílico.



Fonte: Acervo pessoal.

Tabela 2 – Características do meio filtrante.

*Tratamento da superfície	Calandrado e chamuscado
*Porcentagem de Fibras	100% acrílico
*Volume de poros [%]	82
*Permeabilidade ao ar NBR 13706 (cfm/pé ² a ½" H ₂ O)	51
Diâmetro médio das fibras [µm]	26,53 (±3,55)
*Gramatura [g/m ²]	550
*Densidade [g/cm ³]	0,25
*Espessura [mm]	2,2

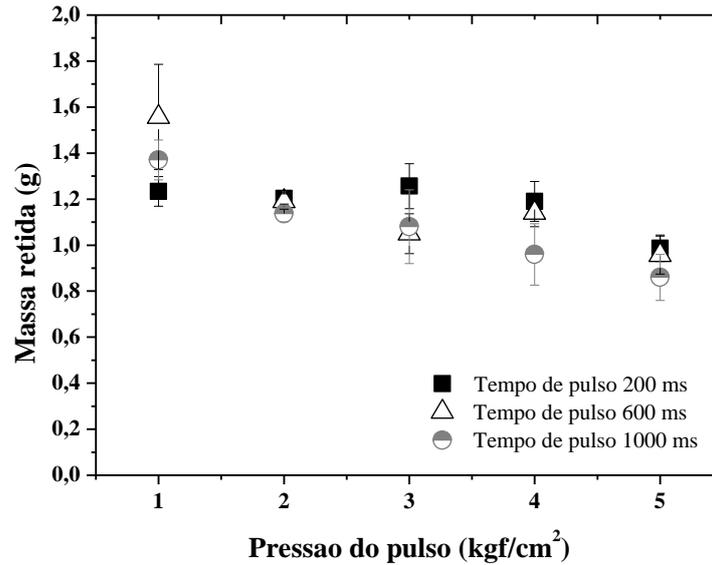
*Fornecido pelo fabricante.

Fonte: Acervo pessoal.

4.3.2 Investigações dos parâmetros operacionais de limpeza

Na Figura 30 está apresentada a massa retida em função da pressão do pulso. Observa-se que, o maior valor de tempo de pulso e de pressão do pulso, apresentou a menor massa retida, devido a maior ocorrência de força em direção contrária a filtração, facilitando assim, a limpeza do filtro fibroso avaliado. Também verificou-se um decréscimo na massa retida em função da pressão do pulso.

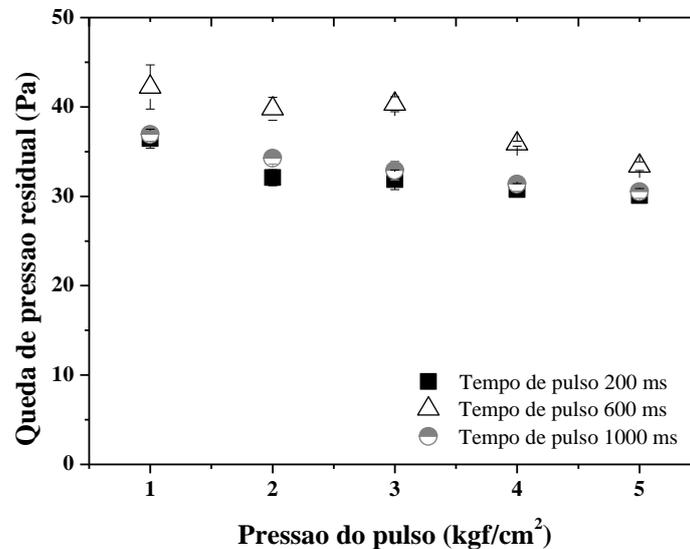
Figura 30 – Massa retida em função da pressão do pulso de limpeza.



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 31 está apresentada a queda de pressão residual em função da pressão do pulso. Analisando a Figura 31, verifica-se que a queda de pressão residual diminuiu, devido ao aumento da pressão do pulso. No entanto, o tempo de pulso não interferiu na redução da queda de pressão residual, já que foram observados valores semelhantes de queda de pressão residual, utilizando o tempo de pulso de 200 e 1.000 ms, aplicando todos os valores de pressão de pulso.

Figura 31 – Queda de pressão residual em função da pressão do pulso de limpeza.



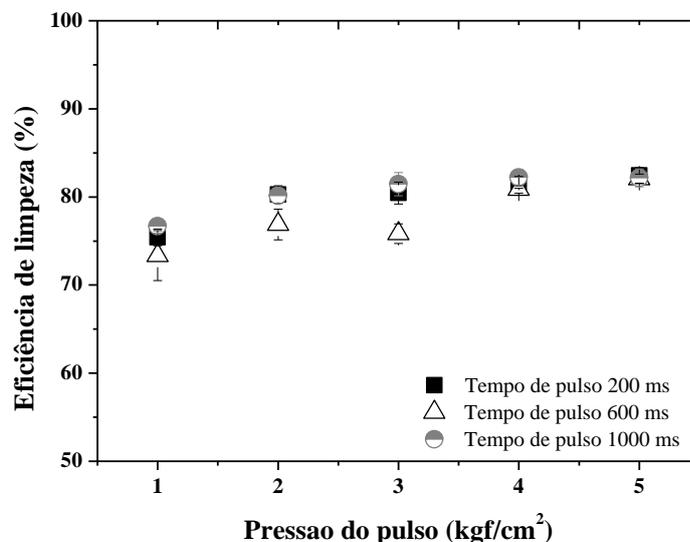
Fonte: Acervo pessoal.

Na pressão de 1 kgf/cm², o tempo de pulso de 600 ms apresentou a maior queda de pressão residual em relação aos demais tempos avaliados, visto que, apresentou 42 Pa ($\pm 2,4$), 36 Pa ($\pm 1,0$) e 37 Pa ($\pm 0,7$), para os tempos de pulso de 600 ms, de 200 ms e de 1000 ms, respectivamente. Assim, como na pressão de 1 kgf/cm², os valores de queda de pressão residual foram bem próximos aplicando o tempo de pulso de 200 e 1000 ms, e pressão de pulso igual ou maior que 2 kgf/cm².

Entretanto, na pressão de pulso de 2 kgf/cm², os valores de queda de pressão residual não tiveram muita alteração, em comparação com os tempos de pulso, uma vez que, foram 32 Pa ($\pm 0,8$), 40 Pa ($\pm 1,3$) e 34 Pa ($\pm 0,6$), utilizando tempo de pulso de 200 ms, 600 ms e 1000 ms, respectivamente.

Na Figura 32 está apresentada a eficiência de limpeza em função da pressão do pulso. Nesta figura é possível constatar que, a eficiência de limpeza aumentou com o acréscimo da pressão do pulso. Aplicando a pressão de 1 kgf/cm², os valores de eficiência de limpeza foram bem próximos, sendo o tempo de pulso de 1000 ms, o que apresentou a maior eficiência de limpeza do filtro fibroso (77% $\pm 0,7$). Já o tempo de pulso de 600 ms, apresentou menor eficiência de limpeza (73% $\pm 2,8$). Entretanto, observa-se que, os resultados de eficiência de limpeza do meio filtrante aplicando o tempo de pulso de 200 ms foram semelhantes na maioria das pressões analisadas (2, 3, 4 e 5 kgf / cm²).

Figura 32 – Eficiência de limpeza em função da pressão do pulso de limpeza.



Fonte: Acervo pessoal.

Desta forma, pode-se verificar que, não é necessário utilizar pressões de pulso acima de 2 kgf/cm², uma vez que, nesta pressão de pulso, a eficiência de limpeza foi de aproximadamente 80,3% ($\pm 0,9$), 76,8% ($\pm 1,7$) e 80,1% ($\pm 0,8$), utilizando os tempos de pulso

de 200 ms, 600 ms e 1000 ms, respectivamente. Assim, pode-se verificar que, os valores de tempo e de pressão de pulso em 200 ms e 2 kgf/cm^2 , apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais analisados.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo, analisaram-se alguns conceitos sobre os parâmetros operacionais de limpeza aplicados na operação de filtração de gases por pulso de ar reverso.

A partir do exposto neste capítulo, as observações deste trabalho produziram resultados como: da eficiência de limpeza não apresentar grandes aumentos, devido ao aumento da pressão e do tempo de pulso.

Verificou-se que os tempos de pulso analisados, 200 e 1000 ms, não apresentaram grandes alterações nos valores de eficiência de limpeza e de queda de pressão residual. Por isso, verificou-se que não há necessidade de utilizar tempos muito longos de pulso, valores acima de 200 ms e 2 kgf/cm^2 para a regeneração do meio filtrante, evitando assim, que valores de pressão e de tempo de pulso muito altos, prejudiquem a estrutura do filtro fibroso, provocando um desgaste maior das fibras.

Considerando a boa concordância dos valores obtidos de queda de pressão residual e de eficiência de limpeza, aplicando-se estas variáveis operacionais de limpeza (tempo de 200 ms e pressão de pulso 2 kgf/cm^2), eles foram incorporados à rotina de aquisição de dados de filtração, de modo a se obter uma análise mais detalhada dos filtros fibrosos, contendo diferentes tratamentos na superfície, um dos principais objetivos deste trabalho. Além disso, no próximo capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos sobre a avaliação do desempenho e eficiência de filtros fibrosos, com diferentes tratamentos de superfície.

CAPÍTULO 5 – INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE NO DESEMPENHO DOS FILTROS FIBROSOS

No capítulo anterior, foram apresentadas algumas análises da influência dos parâmetros operacionais de limpeza. Considerando os bons resultados obtidos para a influência desta variável (200 ms e 2 kgf/cm²) foi possível utilizar estes valores na análise da influência do tratamento de superfície no desempenho dos filtros fibrosos.

Sendo assim, neste capítulo, serão apresentadas primeiramente as características dos meios filtrantes de fibras de poliéster com diferentes tratamentos de superfície, isto é, os principais resultados de caracterização destes filtros fibrosos. Posteriormente, serão mostrados os testes de filtrações e as principais análises destes testes como a massa retida, a queda de pressão residual e a eficiência de limpeza. Além disso, serão apresentados os resultados das análises de permeabilidade e de eficiência de coleta dos meios filtrantes submetidos à regeneração por pulso de ar reverso.

5.1 Introdução

A principal motivação desta pesquisa é o fato de que a análise do comportamento dos meios filtrantes depois de submetidos à regeneração por pulso de ar reverso ainda é pouco estudado, principalmente envolvendo os filtros fibrosos com diferentes tratamentos de superfície. Mesmo que tem aumentado o número de pesquisas com o objetivo de analisar o desempenho dos meios filtrantes, a grande maioria deles apresenta algum fator que necessita uma melhor compreensão da técnica de limpeza por pulso de ar reverso e das características dos filtros fibrosos investigados.

Por isso, o objetivo deste capítulo foi utilizar meio poroso de fibras de poliéster com e sem tratamento na superfície, devido à necessidade de verificar qual o tratamento mais resistente nos processos industriais, por meio da análise da sua eficiência de coleta após sucessivas regenerações por pulso de ar reverso.

5.2 Materiais e métodos

Nesta seção, será apresentado o material e os procedimentos experimentais adotados na análise da influência do tratamento de superfície no filtro fibroso.

5.2.1 Materiais

O material particulado utilizado foi o calcário dolomítico, cuja caracterização encontra-se no Capítulo 4 (Seção 4.3.1). Obtiveram-se os seguintes valores: 2,75 ($\pm 0,01$) g/cm³ de massa específica, 0,63 ($\pm 0,08$) de circularidade média das partículas e 9,60 ($\pm 0,16$) μ m de diâmetro médio volumétrico.

Os meios filtrantes utilizados foram de fibras de poliéster, sem tratamento e com o tratamento na superfície. Os tratamentos aplicados nos filtros fibrosos foram o chamuscado/calandrado e calandrado/termofixado com acabamento de anti-pilling (face lisa) tipo Egg-Shell em uma das faces. O meio filtrante de fibra de poliéster foi escolhido devido ser uma das fibras mais aplicadas em filtros de mangas para a coleta de particulados na indústria.

A caracterização dos meios filtrantes foi realizada a partir de imagens das superfícies obtidas no MEV-FEG, descritas em detalhe no Capítulo 3 (Seção 3.1.2).

5.2.2 Procedimentos experimentais

Os testes de filtração foram conduzidos no equipamento de filtração de gases por pulso de ar reverso, apresentado na Figura 11. Nesta etapa foram realizados 50 ciclos de filtração, utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3 (Seção 3.2).

Durante as filtrações, o sistema de aquisição de dados permitiu o registro da queda de pressão (ΔP) em função do tempo (t). No instante que a queda de pressão atingia o máximo valor previsto ($\Delta P_{\text{máx}}$) de 100 Pa, um pulso de ar foi ativado em um tempo (t_p) de 200 ms e uma pressão de pulso (P_p) de 2 kgf/cm² em direção oposta ao fluxo de gás, desprendendo a camada de pó formada. Estes valores foram obtidos por meio de estudos, apresentados no Capítulo 4. A velocidade superficial de filtração (v_s) foi mantida constante a 4 cm/s durante as operações de filtrações.

Após o primeiro, o vigésimo quinto e o quinquagésimo ciclo de filtração, as amostras dos filtros fibrosos utilizados foram submetidas à análise de permeabilidade e de eficiência de coleta, utilizando os equipamentos apresentados no Capítulo 3.

As análises de eficiência de coleta e de permeabilidade foram descritas em detalhes na Seção 3.3 e 3.4, respectivamente.

5.3 Resultados e discussões

Nesta seção, serão apresentados os resultados e discussões sobre as caracterizações e as análises dos meios filtrantes com e sem tratamento de superfície depois de submetidos aos testes de filtrações por pulso de ar reverso.

5.3.1 Caracterização dos meios filtrantes

Na Figura 33 estão apresentadas as imagens obtidas em MEV-FEG das superfícies dos meios filtrantes de poliéster sem tratamento (NT), com tratamento de chamuscagem e calandragem (TCC) e tratamento de calandragem e termofixagem com acabamento anti-pilling (TCT-AP). Com as imagens do MEV-FEG (Figura 33) e com o programa de análise de imagens (*Image Pro Plus 7.0*) foi possível determinar o diâmetro médio das fibras. Esta técnica apresenta-se descrita no Capítulo 3 (Seção 3.1.2).

As análises das imagens do MEV mostram as diferenças das superfícies dos meios filtrantes de poliéster. Na Figura 33 (a) observa-se que os filamentos de fibras são orientados ao acaso. No entanto, na Figura 33 (b) observam-se alguns aglomerados de fibras na região localizada no centro do filtro TCC analisado, possivelmente ocasionado pelos tratamentos que esta superfície foi submetida (chamuscagem e calandragem). Entretanto, na Figura 33 (c) é observado que o tratamento ocorreu em praticamente toda a superfície do meio filtrante (TCT-AP) devido à presença de aglomerados de fibras em toda superfície do meio filtrante e menor quantidade de espaços vazios entre as mesmas.

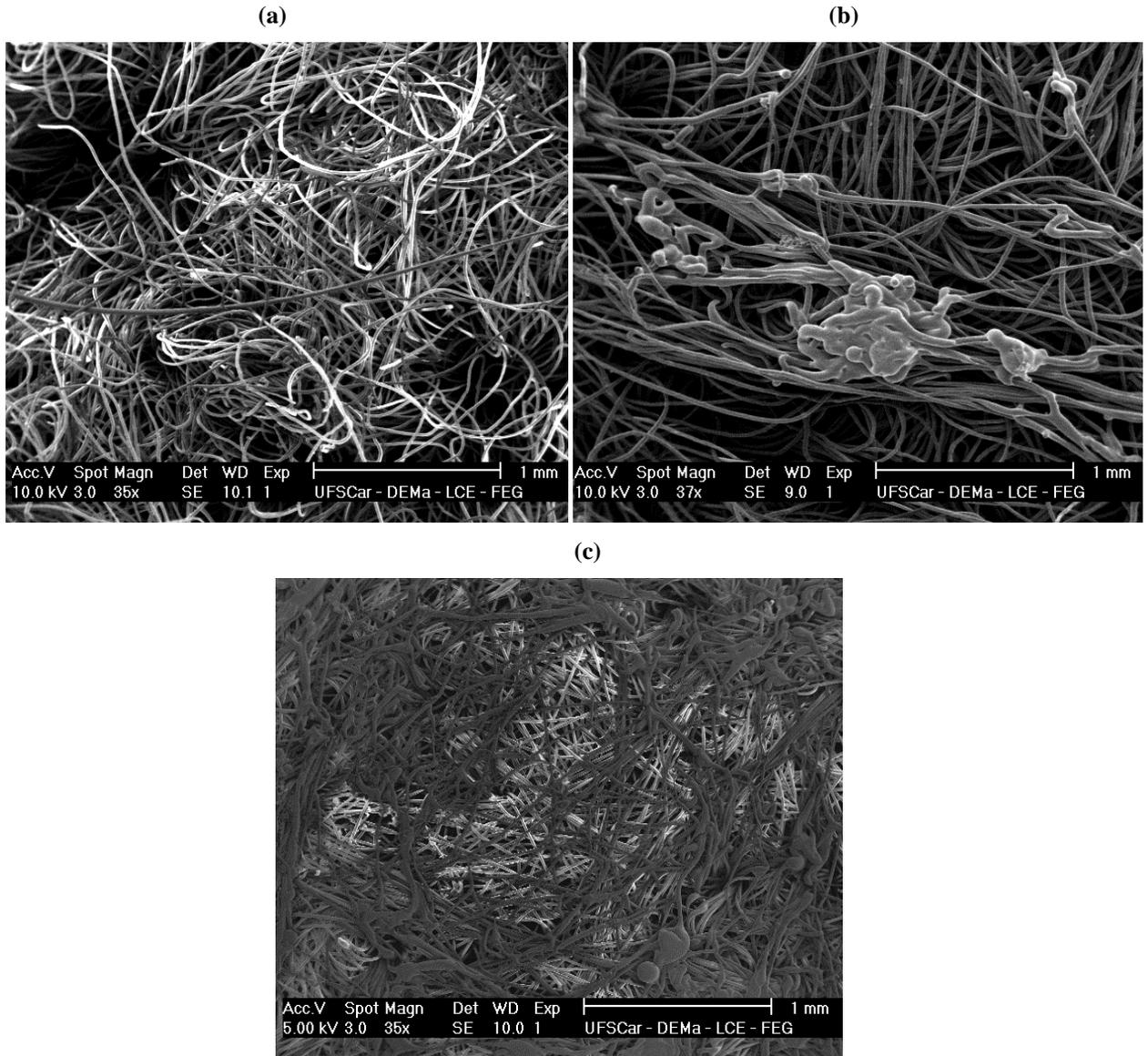
As principais características dos meios filtrantes estão apresentadas na Tabela 3. As análises das propriedades das fibras foram realizadas em triplicatas.

Tabela 3 – Características dos meios filtrantes.

Tratamento da superfície	Não tratado (NT)	Tratado(TCC)	Tratado (TCT-AP)
Porcentagem de Fibras	100% poliéster	100% poliéster	100% poliéster
Diâmetro médio das fibras [μm]	15,40 ($\pm 1,90$)	17,70 ($\pm 0,50$)	16,50 ($\pm 1,20$)
Gramatura [g/m^2]	550	550	550
Permeabilidade (k_1)[m^2]	$1,18 \times 10^{-10}$	$5,94 \times 10^{-11}$	$3,82 \times 10^{-11}$
Espessura [mm]	3,21 ($\pm 0,06$)	1,90 ($\pm 0,09$)	2,10 ($\pm 0,10$)
Volume de poros (%)	88,00 ($\pm 3,00$)	82,00 ($\pm 2,00$)	80,00 ($\pm 3,00$)

Fonte: Acervo pessoal.

Figura 33 – MEV dos meios filtrantes de fibras de poliéster (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP.



Fonte: Acervo pessoal.

5.3.2 Ensaio de filtração

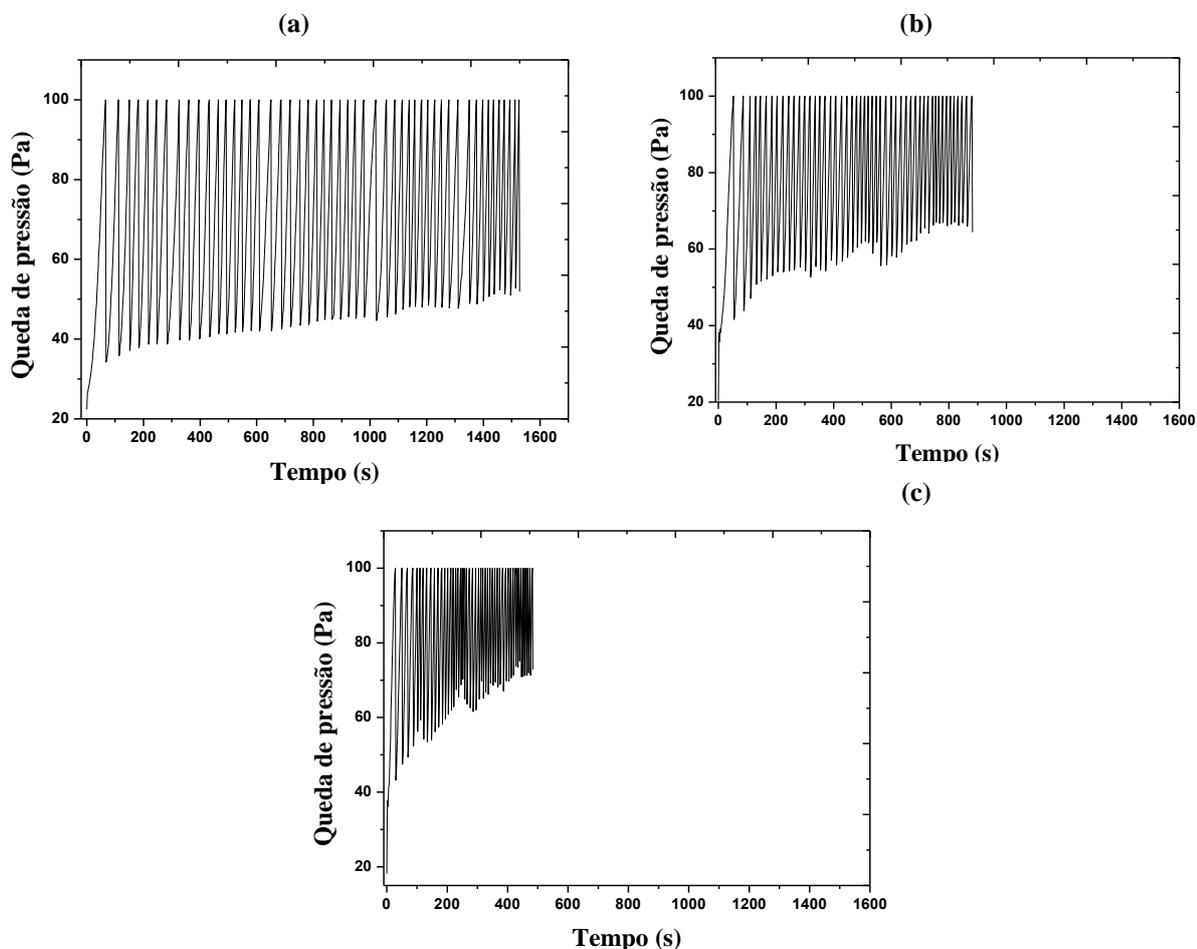
Na Figura 34 estão apresentados os testes de filtração e limpeza utilizando os feltros agulhados de fibras de poliéster: (a) sem tratamento (NT), (b) chamuscado e calandrado (TCC) e (c) calandrado e termofixado com anti-pilling (TCT-AP) para 50 ciclos de filtração. Estes ensaios de filtração foram realizados em triplicata, porém para melhor visualização estão apresentadas apenas uma das curvas (Figura 34).

As curvas de filtração mostraram que para a pressão máxima de filtração de 100 Pa, o tratamento na superfície dos filtros de poliéster reduziu o tempo de filtração, ocasionando períodos de ciclos de filtração mais curtos, como mostram as Figura 34 (b) e (c).

Os tempos médios de filtração, para completar os 50 ciclos (média de três ensaios de filtração) no meio filtrante NT foi de 1.394 s (± 78), no filtro TCC foi de 1.156s (± 30) e no filtro TCT-AP foi de 443s (± 26). Desta forma, os filtros com tratamento na superfície apresentaram fibras mais fechadas e um menor tempo de filtração, ocasionada principalmente pela dificuldade de limpeza das partículas depositadas no interior do meio filtrante utilizando o pulso de ar reverso.

O filtro TCT-AP de superfície tratada apresentou uma filtração superficial devido a maior porcentagem de volume de poros em relação aos demais filtros avaliados (NT e TCC), que mostraram características de filtração de profundidade mais pronunciada e uma menor porcentagem de volume de poros.

Figura 34 – Queda de pressão em função do tempo de filtração, utilizando os filtros de fibras de poliéster (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP ($\Delta P_{\text{máx}} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm²; $v_s = 4$ cm/s; 50 ciclos).



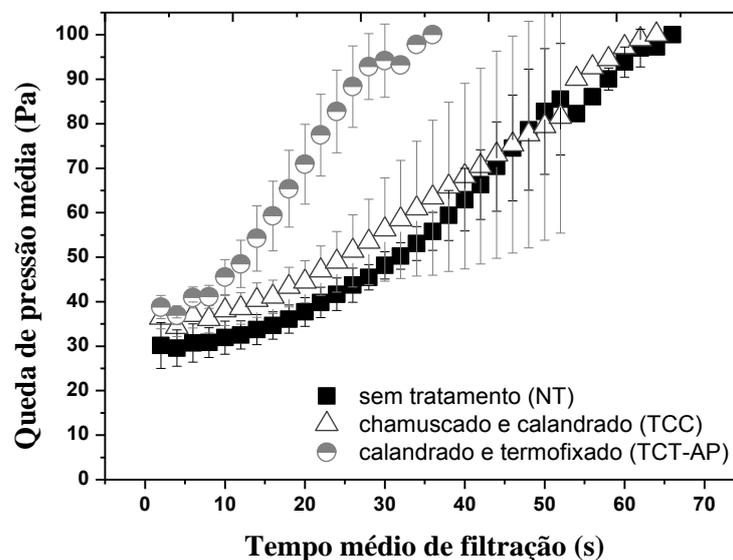
Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 35 está apresentada a curva média dos três ensaios experimentais, referente ao primeiro ciclo de filtração. Os ensaios iniciais de filtração mostraram que há uma

semelhança entre as curvas dos filtros NT e TCC. Os valores de tempo médio de filtração apresentados foram bem próximos, 60 s (± 3) e 58 s (± 20), respectivamente, comparados ao tempo médio de 31 s (± 3) do filtro TCT-AP. No entanto, o meio filtrante TCC apresentou maior desvio entre as curvas, isso pode ser atribuído devido às características desse meio filtrante, por mostrar maior heterogeneidade e maior quantidade de espaços entre as fibras em sua superfície, conforme apresentado na Figura 35.

Avaliando ainda o primeiro ciclo de filtração (Figura 35), pode-se observar que o período de filtração é maior em relação aos ciclos subsequentes (Figura 34). Este comportamento pode ser observado devido à ocorrência da filtração de profundidade, em que se tem a presença da deposição interna entre os espaços vazios das fibras.

Figura 35 – Curva média dos três testes experimentais, de queda em função do tempo de filtração, referente ao primeiro ciclo de filtração, utilizando o meio filtrante de fibra de poliéster, sem tratamento (NT), chamuscado e calandrado (TCC) e calandrado e termofixado com anti-pilling (TCT-AP) ($\Delta P_{\text{máx}} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm²; $v_s = 4$ cm/s; 1 ciclo).

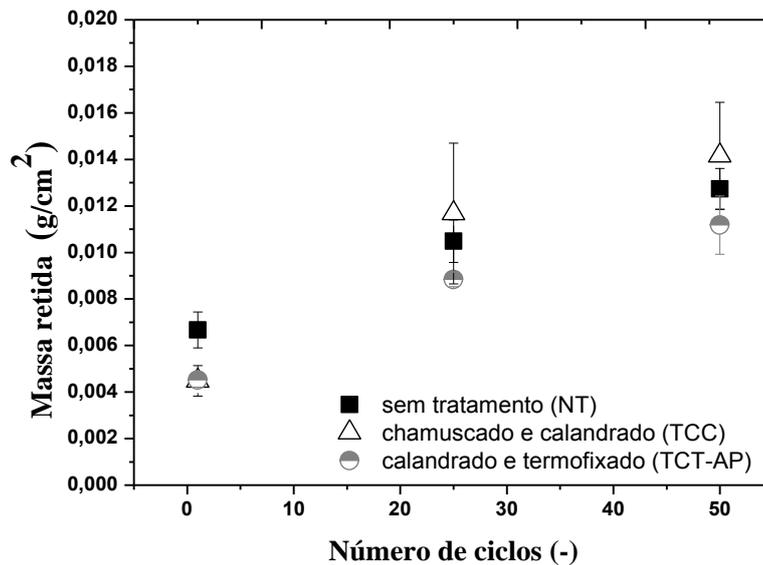


Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 36 estão apresentados os resultados da massa média retida de três ensaios de filtração após a limpeza por pulso de ar reverso. As análises dos resultados mostraram que o filtro de superfície não tratada (NT) reteve a maior quantidade de partículas por unidade de área no primeiro ciclo de filtração, quando comparado com os demais meios filtrantes de superfície tratada. Isto se deve a maior quantidade de partículas depositadas internamente nos filtros não tratados, logo nos períodos iniciais de filtração e por esse filtro ser mais espesso e ter maior permeabilidade.

No entanto, após os 25 e 50 ciclos de filtração, observou-se que o meio filtrante chamuscado e calandrado (TCC) apresentou maior quantidade de massa média retida e o meio filtrante de superfície calandrada e termofixada (TCT-AP) a menor quantidade de massa média retida. Isto mostra que o tratamento da superfície dos filtros pode influenciar na quantidade de material retida no meio filtrante devido à facilidade ou dificuldade de remoção da torta de filtração.

Figura 36 – Massa retida em função do número de ciclos, utilizando os filtros fibrosos (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP ($\Delta P_{\text{máx}} = 100 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 50 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

5.3.3 Eficiência de limpeza

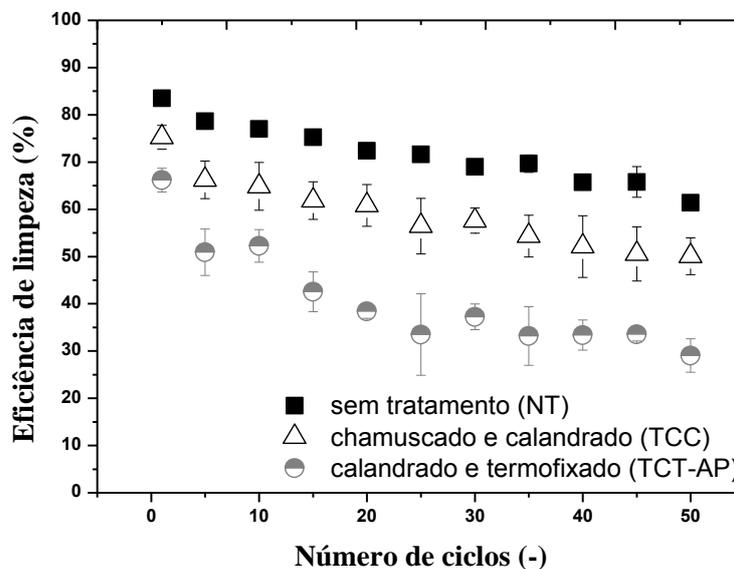
A eficiência de limpeza do meio filtrante é normalmente monitorada pela observação da alteração da queda de pressão (ΔP), após o fim do pulso de ar reverso, assumindo a limpeza uniforme da superfície do meio filtrante submetido ao pulso (KIM et al., 2016; PARK et al., 2012).

Na Figura 37 está apresentada a eficiência de limpeza por pulso de ar reverso, determinada por meio da Equação 17 e dos resultados de queda de pressão. Os resultados mostraram que a eficiência de limpeza é elevada após o primeiro período de limpeza, com valores de 84% ($\pm 1,13$), 75% ($\pm 2,53$) e 66% ($\pm 2,53$) para os filtros NT, TCC, e TCT-AP, respectivamente.

Entretanto, em ciclos subsequentes, os meios filtrantes de fibras de poliéster apresentaram uma tendência à redução da eficiência de limpeza com o aumento dos ciclos de filtração. Após 50 ciclos de filtração a melhor eficiência de limpeza foi do filtro NT (61% $\pm 0,74$), enquanto que os meios filtrantes de superfície TCC e TCT-AP apresentaram uma

eficiência de limpeza de 50% ($\pm 3,87$) e 30% ($\pm 3,52$), respectivamente. Este comportamento está relacionado à dificuldade de remoção das partículas depositadas internamente do meio filtrante, proporcionando uma queda na eficiência de limpeza utilizando o pulso de ar reverso.

Figura 37 – Eficiência de limpeza em função do número de ciclos de filtração, utilizando os filtros fibrosos (a) NT, (b) TCC e (c) TCT-AP ($\Delta P_{\text{máx}} = 100$ Pa; $t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm²; $v_s = 4$ cm/s; 50 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

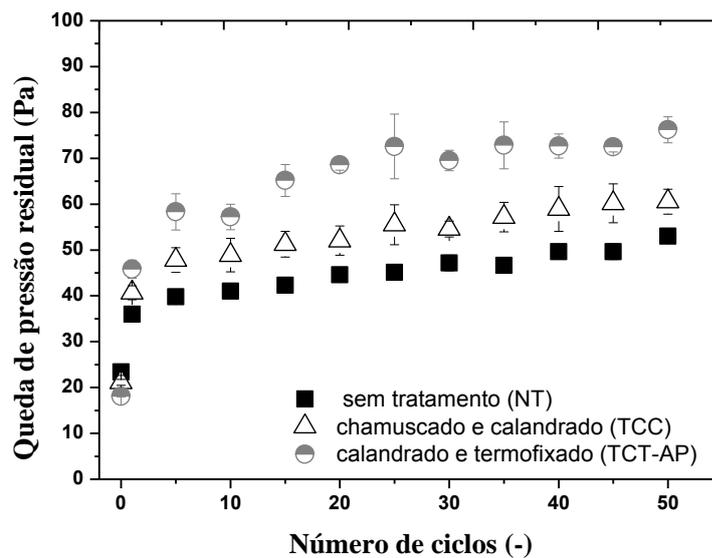
Como já eram esperados, os ciclos iniciais apresentaram maiores eficiência de limpeza, devido a uma maior regeneração do meio filtrante e uma maior aproximação da queda de pressão residual com o valor inicial. De acordo com o Kim et al. (2016), a eficiência de limpeza aproximou-se de 100% nos ciclos iniciais, utilizando a pressão de pulso de 0,3 s em filtros cerâmicos em condições de alta temperatura e alta pressão. Lee et al. (2015), mostraram que a eficiência de limpeza é muito influenciada pela velocidade de filtração. O acréscimo da velocidade de filtração diminuiu consideravelmente a eficiência de limpeza do meio filtrante. Além disso, o aumento dos ciclos de filtração proporcionou uma redução na eficiência de limpeza, para todas as velocidades de filtração analisadas, confirmando os resultados obtidos na Figura 37.

Uma consequência da maior adesão das partículas nas fibras dos meios filtrantes é o constante aumento da queda de pressão residual (ΔP_R), conforme apresentado na Figura 38. O aumento do número de ciclos de filtração proporcionou um pequeno acréscimo na queda de pressão residual, para todos os meios filtrantes avaliados, sendo maior para o meio filtrante TCT-AP. Apesar, do meio filtrante calandrado e termofixado (TCT-AP) apresentar a menor massa retida, a queda de pressão residual foi superior aos demais filtros, devido à filtração

superficial mais pronunciada. Isto comprova que tanto as características dos meios filtrantes quanto as características dos materiais particulados são importantes no desempenho do meio filtrante.

Assim, o tratamento na superfície do filtro pode reduzir a eficiência de limpeza e também aumenta a queda de pressão residual durante os ciclos de filtração. Desta forma, o tratamento pode ter intensificado a adesão partícula-filtro e dificultado ainda mais a remoção completa das partículas coletadas internamente.

Figura 38 – Queda de pressão residual em função do número de ciclos ($\Delta P_{\text{máx}} = 100 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 50 ciclos).



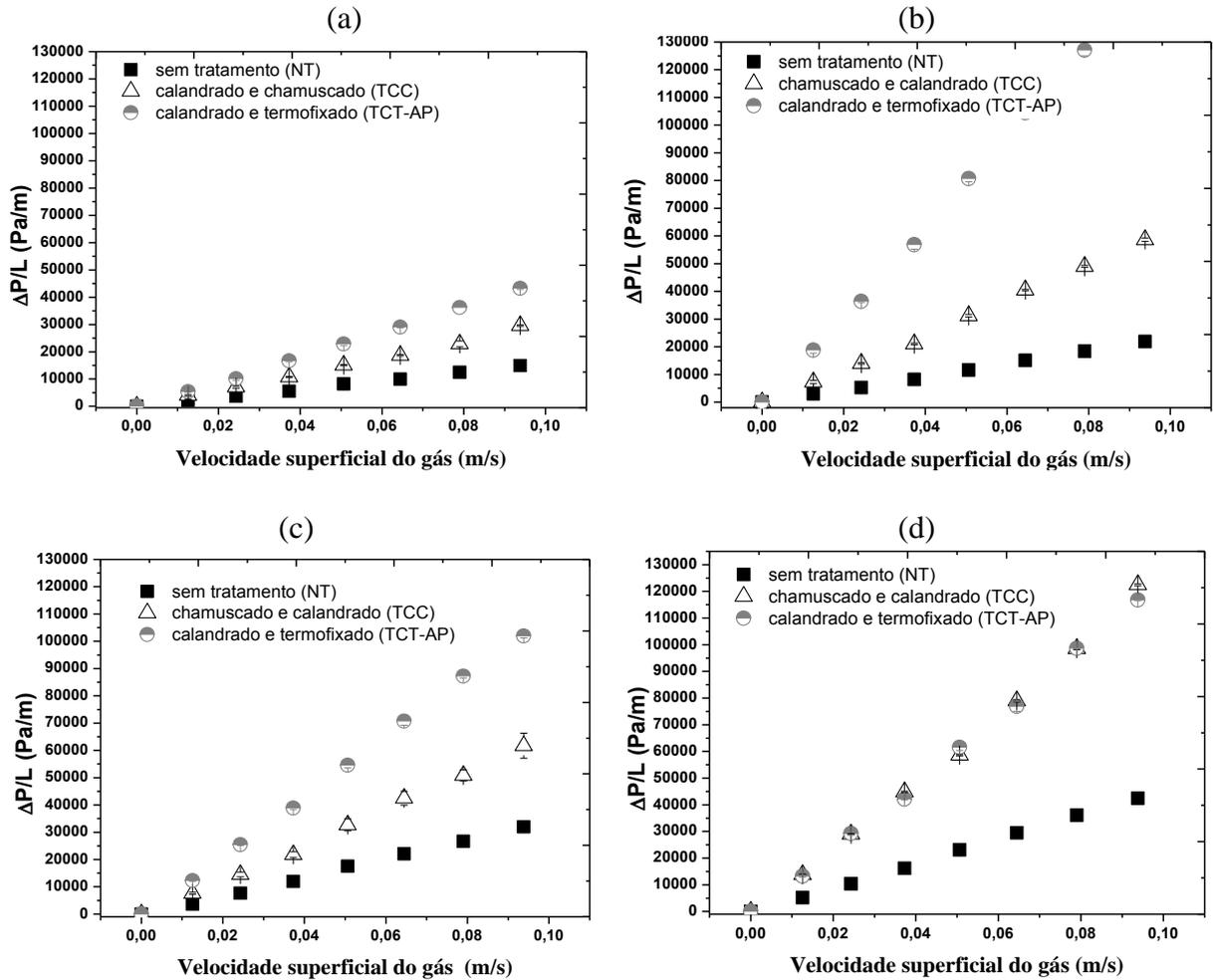
Fonte: Acervo pessoal.

5.3.4 Permeabilidade dos filtros fibrosos

As permeabilidades do meio filtrante virgem e após os ciclos de filtração foram obtidas a partir de dados experimentais utilizando a Equação 19 e o procedimento apresentado no Capítulo 3 (Seção 3.4), por meio das curvas de queda de pressão/espessura ($\Delta P/L$) em função da velocidade superficial do gás (v_s).

Nas Figura 39 (a), (b), (c) e (d) são ilustradas as curvas de queda de pressão / espessura ($\Delta P/L$) em função da velocidade superficial do gás (v_s) para o tecido virgem, após um ciclo, vinte e cinco ciclos e cinquenta ciclos de filtração, respectivamente.

Figura 39 – Queda de pressão/espessura em função da velocidade superficial do gás para os meios filtrantes (a) virgem, (b) após 1 ciclo, (c) após 25 ciclos e (d) após 50 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados apresentaram que os meios filtrantes após 50 regenerações por pulso de ar reverso apresentaram maior queda de pressão em todas as velocidades superficiais do gás avaliadas. No entanto, os meios filtrantes submetidos ao tratamento de superfície apresentaram a queda de pressão mais elevada, em comparação com o meio filtrante sem tratamento de superfície, utilizando as mesmas condições operacionais.

Na Tabela 4, são apresentados os coeficientes angulares (permeabilidade, k_l) determinados de acordo com a Equação de Darcy (Equação 19).

Tabela 4 – Permeabilidade dos meios filtrantes (k_1).

k_1 [m ²]	Ciclo	NT	CC	CT
	0		$1,18 \times 10^{-10}$	$5,94 \times 10^{-11}$
1		$7,77 \times 10^{-11}$	$2,88 \times 10^{-11}$	$9,10 \times 10^{-12}$
25		$5,27 \times 10^{-11}$	$2,75 \times 10^{-11}$	$1,82 \times 10^{-11}$
50		$3,96 \times 10^{-11}$	$1,82 \times 10^{-11}$	$1,82 \times 10^{-11}$

Fonte: Acervo pessoal.

As permeabilidades dos meios filtrantes investigados decresceram com o aumento número de ciclos, devido ao aumento da quantidade de partículas retidas após os ciclos de limpeza por pulso de ar reverso. Também, verificou-se que o meio filtrante sem tratamento (NT), continuou sendo o mais permeável mesmo após submetido aos cinquenta ciclos de filtração em relação aos outros meios filtrantes de superfície tratada. Isto pode ser atribuído às características estruturais das fibras não tratadas apresentarem maiores espaços vazios entre as fibras, proporcionando o melhor escoamento do gás através das mesmas.

5.3.5 Eficiência de coleta dos filtros fibrosos

Na Figura 40 estão mostradas as eficiências de coleta dos meios filtrantes de fibras de poliéster (a) após primeiro ciclo, (b) após 25 ciclos e (c) após 50 ciclos de filtração. Esses resultados foram obtidos aplicando a Equação 21, com as diferenças das concentrações de partículas coletadas na entrada e na saída do filtro em função do diâmetro das partículas. O procedimento experimental utilizado na determinação da eficiência de coleta foi apresentado no Capítulo 3 (Seção 3.3).

A análise da Figura 40 mostrou que a eficiência de coleta variou apenas em um intervalo específico de diâmetros de partícula, correspondente ao intervalo entre 0,542 a 4 μm . Para diâmetros superiores a 3 μm , os meios filtrantes apresentaram uma eficiência de coleta de 100% utilizando o pulso de ar reverso. Schiller e Schmid (2015) observaram tendência semelhante de eficiência de coleta superior a 99% de partículas de calcário de 50 nm a 370 nm com filtros de fibras de PTFE e de polyimide.

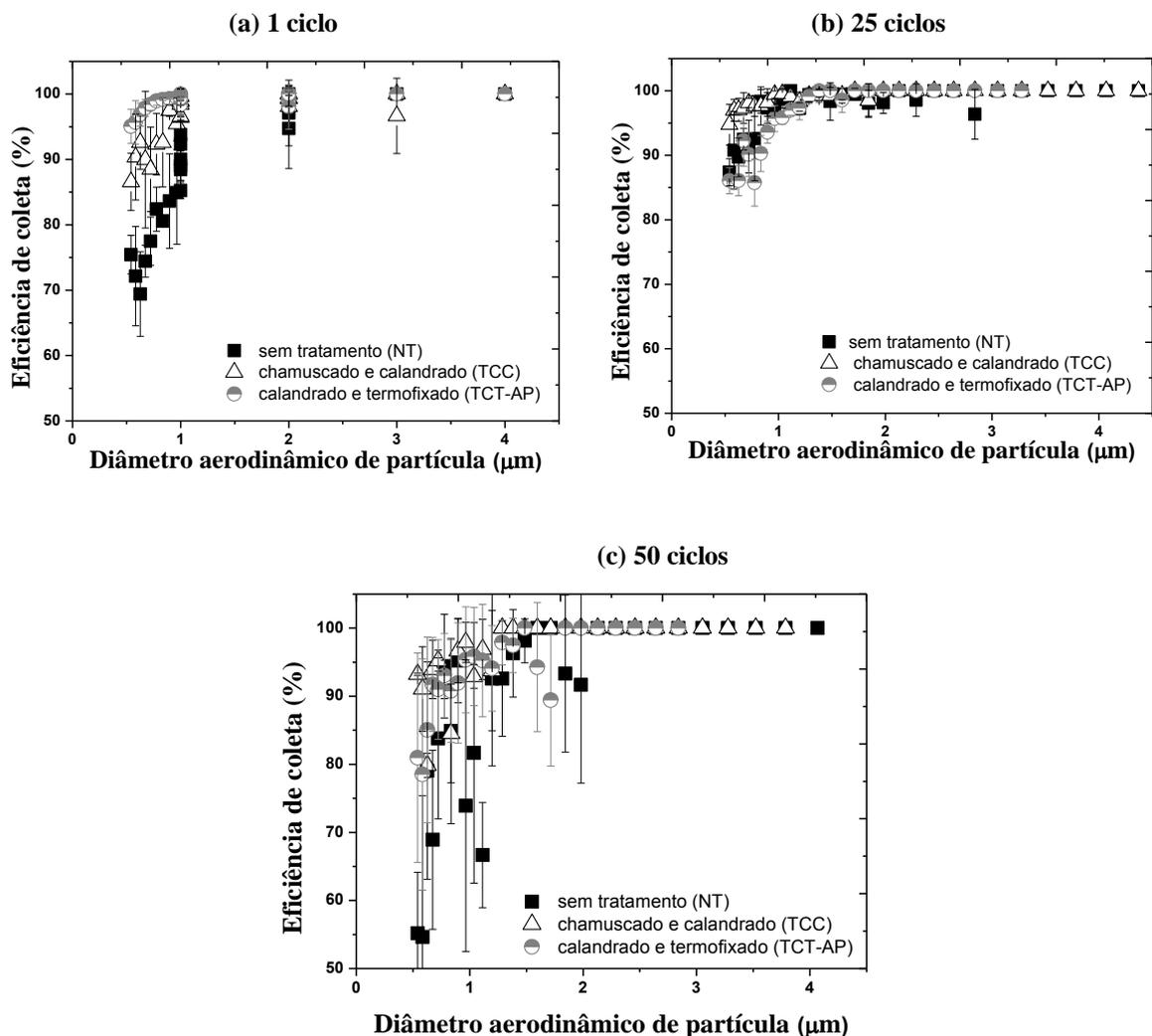
Ainda na Figura 40, no primeiro ciclo de filtração observa-se que o filtro sem tratamento (NT) apresentou uma menor eficiência de coleta em relação aos filtros com tratamento. Este comportamento se deve ao fato do tratamento da superfície evitar que as partículas penetrem no meio filtrante aumentando assim a eficiência de coleta. Após 25 ciclos,

todos os filtros apresentam uma tendência de aumento na eficiência de coleta, devido à presença de partículas retidas começarem a desempenhar o papel do meio filtrante, auxiliando na coleta das partículas de calcário dolomítico. Por fim, nos 50 ciclos, os filtros começam a sofrer os desgastes das limpezas, e as eficiências de coletas começam a diminuir em relação aos ciclos anteriores.

No entanto, o tratamento na superfície do meio filtrante garantiu um melhor desempenho quando submetido a cinquenta regenerações sucessivas por pulso de ar reverso, uma vez que os filtros sem tratamento na superfície apresentaram maiores desgastes das fibras.

Desta forma, verificou-se que, o meio filtrante sujeito ao tratamento de superfície é importante para garantir uma alta eficiência de coleta das partículas, uma vez que, após inúmeras regenerações os filtros tratados continuam com altas eficiências de coleta.

Figura 40 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.

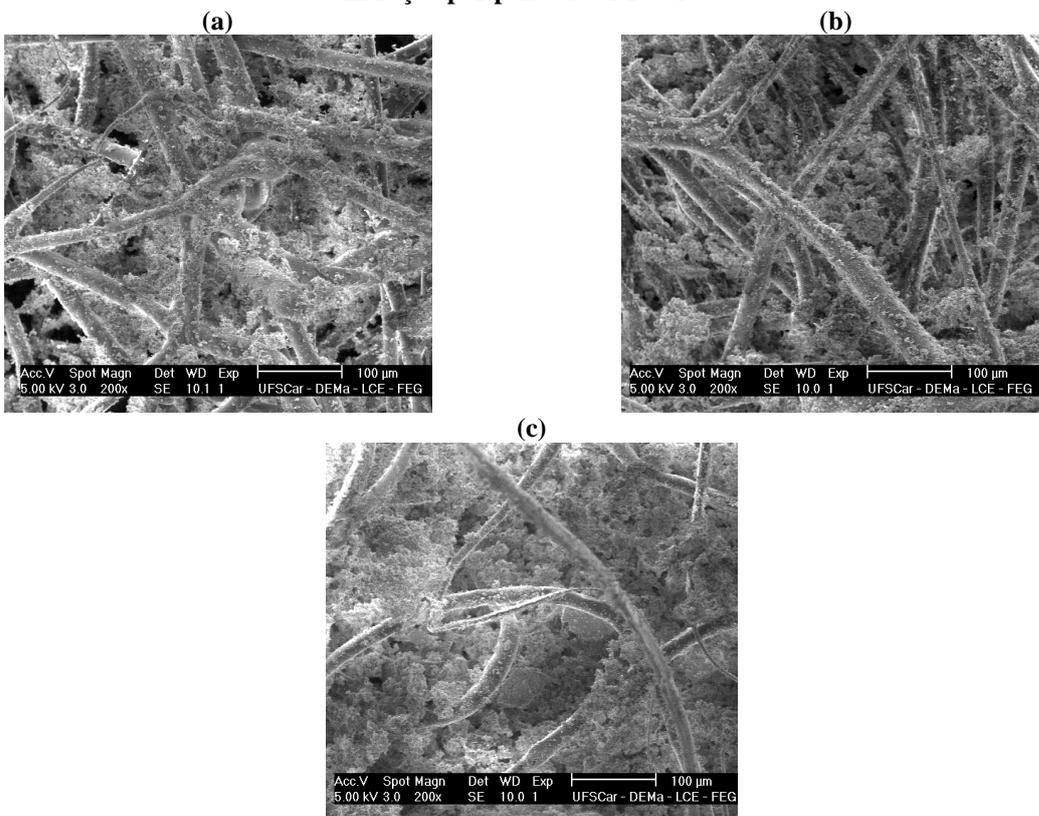


Fonte: Acervo pessoal.

Nas Figuras 41-43 estão mostradas as imagens das partículas depositadas após o ciclo 1, 25 e 50 ciclos de filtração, utilizando os meios filtrantes de fibras de poliéster sem tratamento (NT), chamuscado e calandrado (TCC) e calandrado e termofixado (TCT-AP), respectivamente.

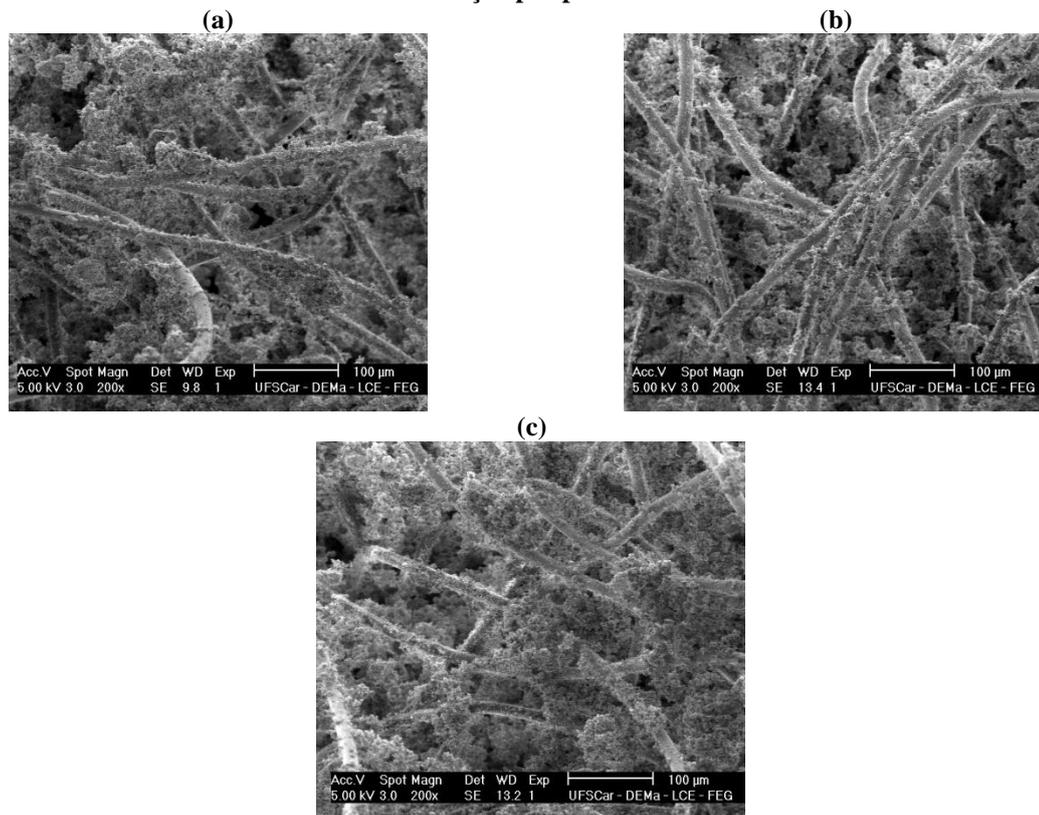
Analisando as Figuras 41-43, observa-se que o meio filtrante sem tratamento na superfície (NT) apresentou menor quantidade de partículas retidas na superfície em relação aos meios filtrantes tratados. Esta constatação pode ser observada na Figura 37, no qual o meio filtrante (NT) apresentou uma maior eficiência de limpeza. Entretanto, para o meio filtrante calandrado e termofixado (TCT-AP) mostrou uma maior quantidade de partículas retidas na sua superfície após os ciclos de filtração, também confirmando os resultados da eficiência de limpeza (Figura 37). Além disso, observou-se que a maior eficiência de coleta do meio filtrante calandrado e termofixado (TCT-AP) ocorreu devido a presença de partículas aderidas as fibras. Porém, na Figura 38 isso proporcionou um aumento da queda de pressão residual.

Figura 41 – Meio filtrante de superfície não tratada NT após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.



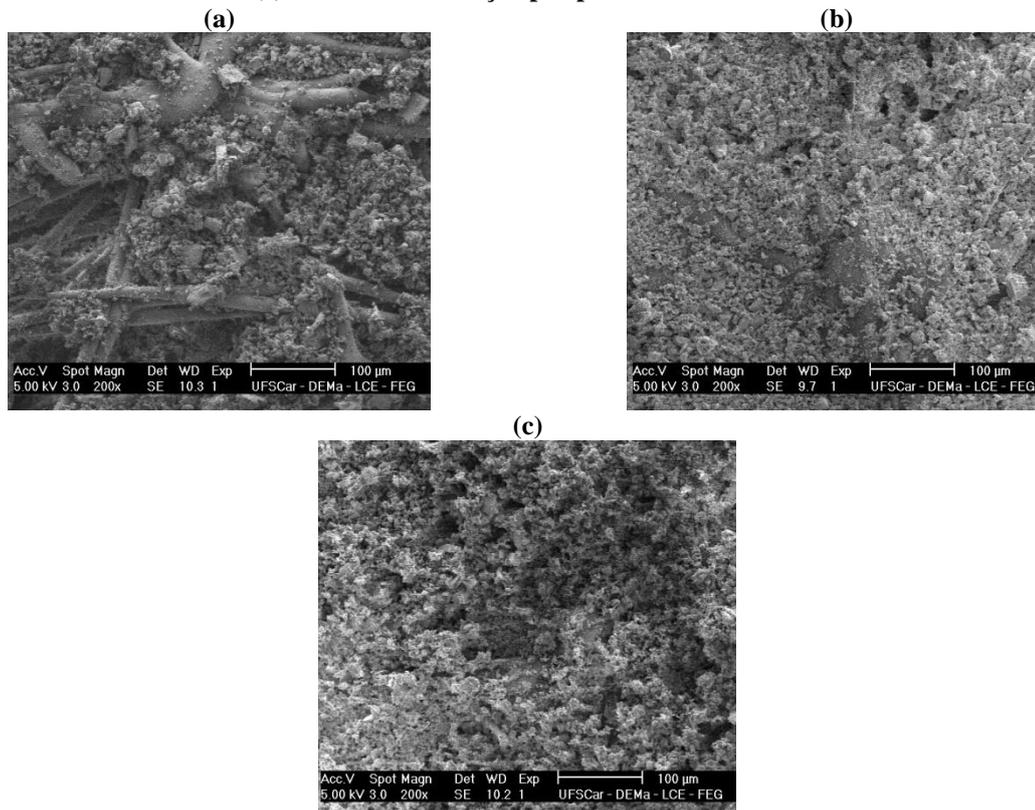
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 42 - Meio filtrante de superfície calandrado e chamuscado TCC após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 43 - Meio filtrante de superfície calandrado e termofixado TCT-AP após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos e (c) 50 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.



Fonte: Acervo pessoal.

5.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma comparação entre os filtros fibrosos sem tratamento e com tratamento de superfície, por meio da análise do desempenho dos mesmos, após cinquenta filtrações por pulso de ar reverso.

Desta forma, verificou-se que, o meio filtrante sem tratamento (NT), apresentou o maior período de filtração, devido ao maior espaçamento e a heterogeneidade entre as fibras. Com isso, o filtro NT apresentou uma maior eficiência de limpeza, uma menor queda de pressão residual e uma maior permeabilidade após cinquenta regenerações. Porém, observou-se um maior desgaste nas fibras após os 50 ciclos de filtração.

Os filtros fibrosos com tratamentos (TCC e TCT-AP) analisados apresentaram valores próximos de permeabilidade, menores eficiências de limpezas e maiores queda de pressão residual após 50 ciclos de filtração. Além disso, esses filtros fibrosos com tratamento (TCC e TCT-AP) apresentaram uma maior eficiência de coleta após os ciclos de filtração, em relação ao filtro fibroso sem tratamento (NT). Isto mostra que o tratamento na superfície do meio filtrante é indispensável para ciclos com longa duração utilizando o pulso de ar reverso.

CAPÍTULO 6 – INFLUÊNCIA DA QUEDA DE PRESSÃO MÁXIMA NO DESEMPENHO DO MEIO FILTRANTE

O presente capítulo descreve uma investigação da influência da queda de pressão máxima aplicada na operação de filtração, para compreender o desempenho do meio filtrante no estágio inicial da filtração (próximo ao ponto de colmatação) e no estágio de formação de torta (próximo ao limite adotado na filtração industrial).

6.1 Introdução

A análise do comportamento do meio filtrante será realizada mantendo os parâmetros utilizados no Capítulo 5.

Desta forma, neste capítulo, serão mostrados os resultados do desempenho do meio filtrante de fibras de poliéster, utilizado no Capítulo 5, por meio da comparação entre a queda de pressão máxima em 1.000 Pa (limite aplicado na filtração industrial) e em 100 Pa (estágio inicial da filtração e próximo ao ponto de colmatação).

Sendo assim, serão apresentados os testes de filtrações e as principais análises destes testes como a massa retida, a queda de pressão residual e a eficiência de limpeza. Além disso, serão apresentados os resultados das análises de permeabilidade e de eficiência de coleta dos meios filtrantes submetidos à regeneração por pulso de ar reverso.

6.2 Materiais e métodos

Nesta seção, serão apresentados os materiais e os procedimentos experimentais adotados na análise da influência da queda de pressão máxima no desempenho do filtro fibroso.

6.2.1 Materiais

O material particulado utilizado foi o calcário dolomítico e o filtro fibroso de poliéster com tratamento de superfície, calandrado e termofixado (TCT-AP). A caracterização do material particulado e do meio filtrante investigado encontra-se no Capítulo 4 (Seção 4.3.1) e no Capítulo 5 (Seção 5.3.1), respectivamente.

6.2.2 Procedimentos experimentais

Os testes de filtração foram conduzidos no equipamento de filtração de gases por pulso de ar reverso, apresentado na Figura 11 (Capítulo 3). Neste capítulo, foram realizados 100 ciclos de filtração, utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3 (Seção 3.2).

Os testes de filtrações foram realizados em duas etapas. A primeira etapa consistiu na aquisição de dados de registro da queda de pressão (ΔP) em função do tempo (t) até a queda de pressão máxima ($\Delta P_{\text{máx}}$) em 100 Pa e a segunda etapa foi observado até o máximo valor previsto ($\Delta P_{\text{máx}}$) de 1.000 Pa.

Durante os testes de filtrações, no instante que a queda de pressão atingia o máximo previsto ($\Delta P_{\text{máx}}$), um pulso de ar foi ativado em um tempo (t_p) de 200 ms e uma pressão de pulso (P_p) de 2 kgf/cm² em direção oposta ao fluxo de gás, desprendendo a camada de pó formada. A velocidade superficial de filtração (v_s) foi mantida constante a 4 cm/s durante as operações de filtrações, conforme os testes de filtrações apresentados nos Capítulos 4 e 5.

O desempenho do meio filtrante (TCT-AP) em diferentes valores de queda de pressão máxima foi observado através das análises de massa retida, da queda de pressão residual, da eficiência de limpeza, da permeabilidade e da eficiência de coleta. Estas análises foram realizadas em triplicatas. A descrição destas análises foi apresentada no Capítulo 3.

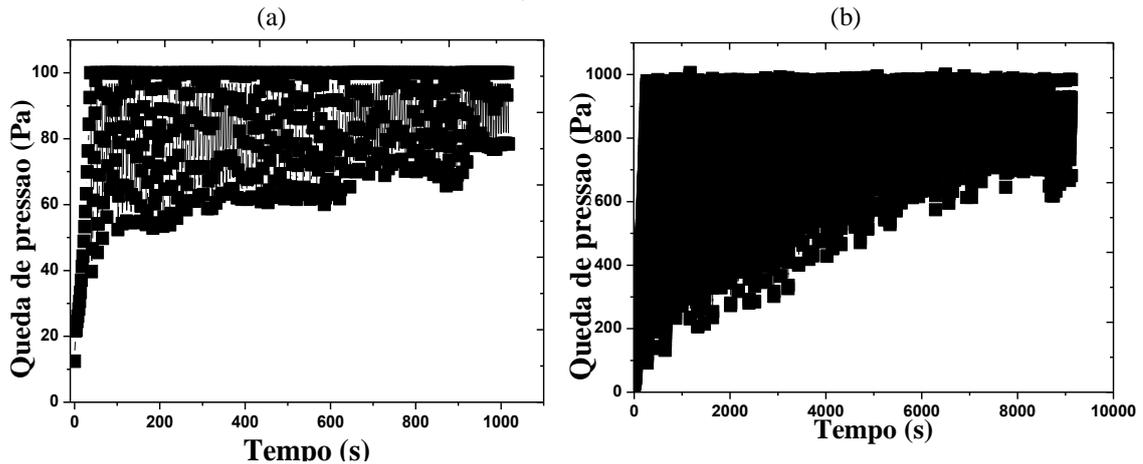
6.3 Resultados e discussões

Nesta seção, serão apresentados os resultados e discussões sobre o desempenho do meio filtrante de fibras de poliéster (TCT-AP) em diferentes valores de queda de pressão máxima aplicados na filtração.

6.3.1 Características do meio filtrante após a filtração

Na Figura 44 estão apresentados os 100 ciclos de filtração utilizando o filtro fibroso de poliéster (TCT-AP) até a queda de pressão máxima (a) 100 Pa e (b) 1.000 Pa. Observa-se que o tempo médio de filtração aumentou com o acréscimo da queda de pressão máxima como já era esperado, uma vez que, o tempo médio de filtração apresentou 918 s (± 112) e 9.569 s (± 445) aplicando a queda de pressão máxima em 100 e 1.000 Pa, respectivamente.

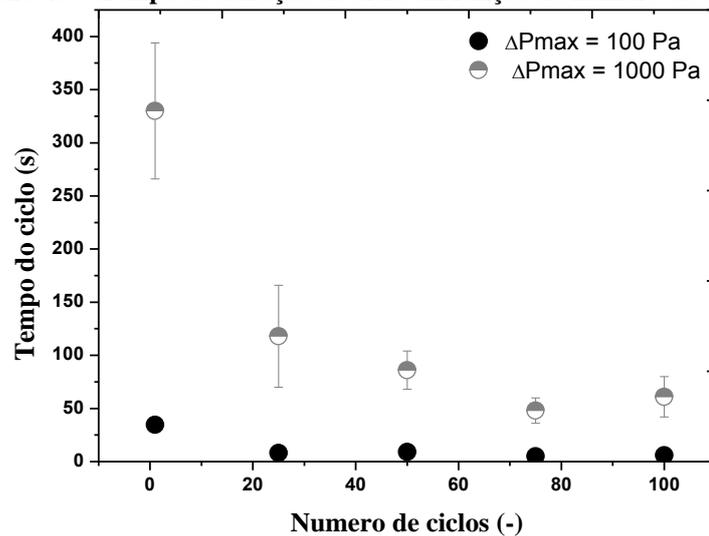
Figura 44 – Ensaio de filtração em $\Delta P_{\text{máx}}$ de (a) 100 Pa e (b) 1000 Pa ($t_p = 200$ ms; $P_p = 2$ kgf/cm²; $v_s = 4$ cm/s; 100 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 45 está representado o tempo médio de duração de cada ciclo em função do número de ciclos de filtração, para facilitar a comparação entre as quedas de pressões máximas avaliadas.

Figura 45 – Tempo de duração do ciclo em função do número de ciclos.



Fonte: Acervo pessoal, 2016.

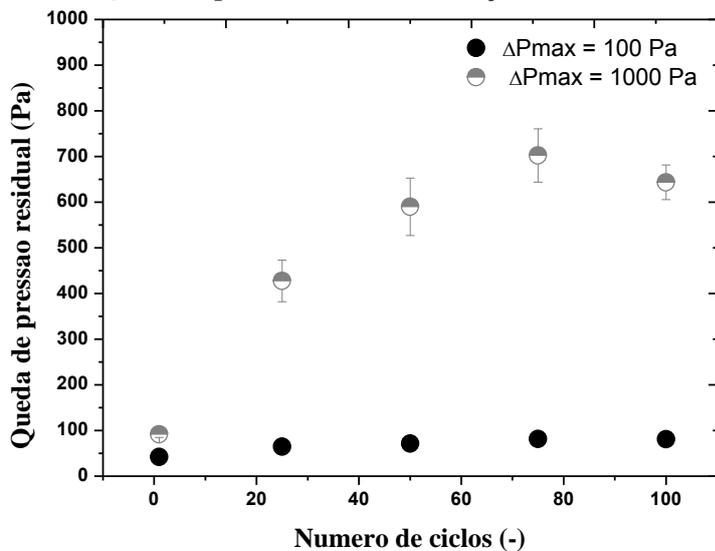
Observou-se que, diminuiu o tempo médio de filtração à medida que aumentou o número de ciclos. O primeiro ciclo de filtração apresentou o maior período de filtração em relação aos ciclos subsequentes. Este comportamento pode ser observado devido à ocorrência da filtração de profundidade, em que se tem a presença da deposição interna entre os espaços vazios das fibras.

Assim, como já era esperado, o tempo de duração do ciclo utilizando o meio filtrante

de fibras de poliéster foi maior quando se aplicou a queda de pressão máxima de 1.000 Pa, em todos os ciclos analisados. O tempo de duração do centésimo ciclo foi de 6 s (± 2) a queda de pressão máxima de 100 Pa, e de 61 s (± 19) aplicando a queda de pressão máxima de 1.000 Pa.

A queda de pressão total aumenta, devido à deposição de partículas sobre a superfície dos meios filtrantes, com o tempo de operação da filtração. Para garantir um funcionamento regular desses elementos filtrantes, a camada de pó de calcário foi removida por pulso de ar reverso, em tempo de pulso e pressão de pulso determinados (200 ms e 2 kgf/cm²), promovendo assim, a sua regeneração entre os intervalos de limpeza. A queda de pressão no meio filtrante após a remoção da camada de pó é chamada de queda de pressão residual e está representada na Figura 46, em função do número de ciclos de filtração.

Figura 46 – Queda de pressão residual em função do número de ciclos.



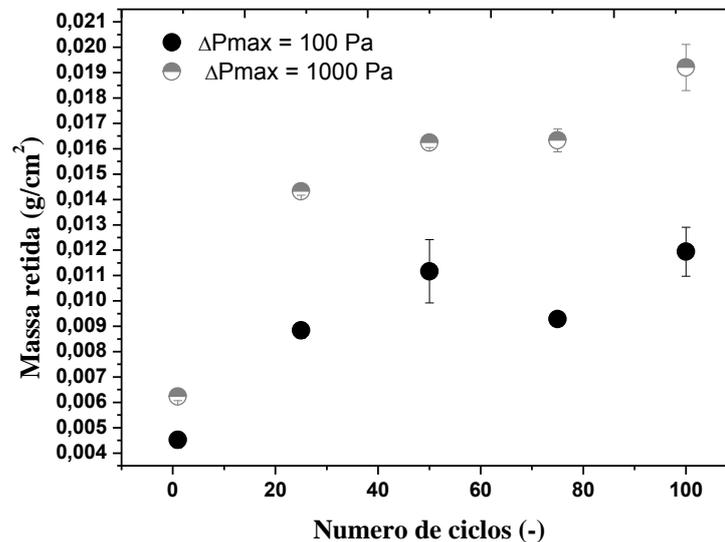
Fonte: Acervo pessoal, 2016.

Na Figura 46, constatou-se que ocorreu um aumento na queda de pressão residual à medida que aumentou o número de ciclos, aplicando a queda de pressão máxima em 1.000 Pa. Entretanto, este comportamento não foi pronunciado ao aplicar a queda de pressão máxima em 100 Pa devido a pouca alteração de queda de pressão residual. A queda de pressão residual observada após o centésimo ciclo de filtração foi de 81 Pa (± 2) e de 643 Pa (± 38), ao aplicar 100 Pa e 1.000 Pa, respectivamente.

O maior tempo médio de filtração e a maior queda de pressão residual média após a limpeza do meio filtrante foram observados após o centésimo ciclo de filtração. Desta forma, verifica que, à medida que se aumentou o número de ciclos de filtração, mais partículas foram depositadas no meio filtrante. Isso pode ser atribuído ao aumento da massa retida.

Na Figura 47 está apresentada a massa retida após a limpeza em função do número de ciclos de filtração. Verifica-se que, o acúmulo de material particulado foi mais acentuado no centésimo ciclo de filtração, como era esperado. O filtro fibroso de poliéster (TCT-AP) analisado apresentou maior quantidade de massa retida, ou seja, o maior acúmulo de partículas retidas após a limpeza, utilizando a queda de pressão máxima de 1.000 Pa, em relação a queda de pressão máxima de 100 Pa.

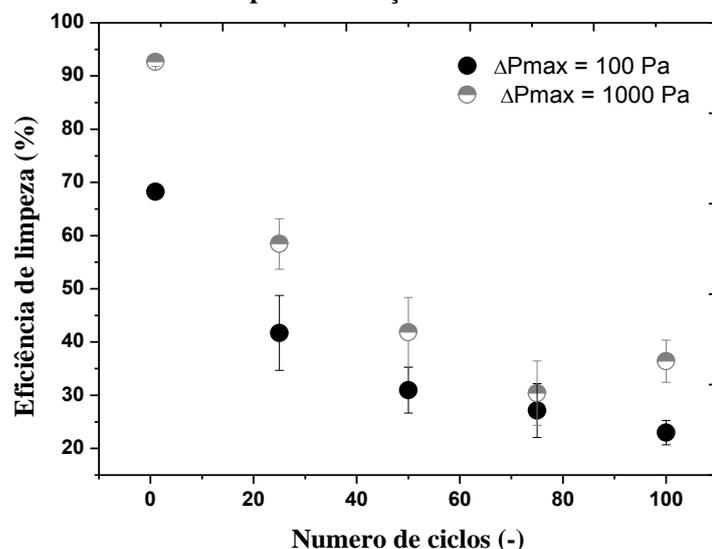
Figura 47 – Massa retida após a limpeza em função do número de ciclos.



Fonte: Acervo pessoal, 2016.

Na Figura 48, estão apresentadas as eficiências de limpeza por pulso de ar reverso, média dos três ensaios realizados, obtidas por meio da Equação 17.

Figura 48 – Eficiência de limpeza em função do número de ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal, 2016.

A análise da Figura 48 mostrou que a eficiência de limpeza foi alta para o primeiro

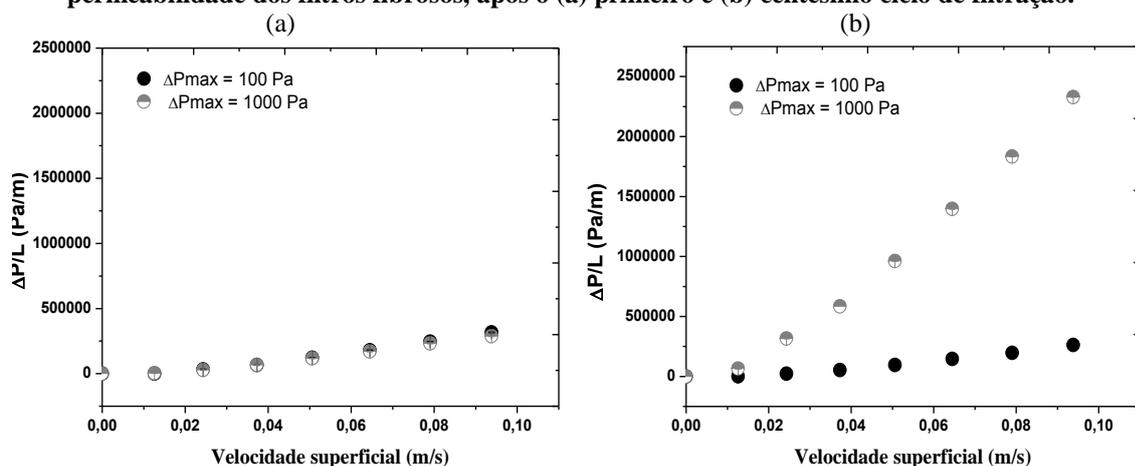
intervalo de limpeza (>65%). Entretanto, uma tendência decrescente da eficiência de limpeza foi observada devido ao aumento dos intervalos de limpeza por pulso de ar reverso. Isso é explicado devido à influência da massa retida e da queda de pressão residual após cada limpeza do meio filtrante, ocasionando um aumento das partículas retidas no interior do meio filtrante e promovendo assim, uma maior resistência à limpeza e uma redução na sua eficiência de remoção da torta.

Outra verificação importante na avaliação do comportamento do meio filtrante após sua utilização refere-se a sua permeabilidade e sua eficiência de coleta.

Os ensaios de permeabilidade dos filtros fibrosos foram realizados na unidade experimental descrita no Capítulo 3.

Na Figura 49 está apresentada a curva média dos três experimentos realizados, da queda de pressão (ΔP) sobre a espessura do meio filtrante (L) em função da velocidade superficial do gás, para as diferentes quedas de pressões investigadas, após (a) o primeiro e (b) o centésimo ciclo de filtração.

Figura 49 - Velocidade superficial do gás em função da queda de pressão, obtida para a determinação da permeabilidade dos filtros fibrosos, após o (a) primeiro e (b) centésimo ciclo de filtração.



Fonte: Acervo pessoal, 2016.

Com os ajustes das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial no meio filtrante (Figura 49), obteve-se a permeabilidade em função do número de ciclos de filtração, conforme apresenta a Tabela 5.

Verifica-se que, a permeabilidade do meio filtrante investigado, diminuiu com o aumento do número de ciclos, a queda de pressão máxima de 1.000 Pa, confirmando que a massa retida após a limpeza interfere na permeabilidade dos meios filtrantes. Contudo, utilizando a queda de pressão máxima de 100 Pa, poucas modificações na permeabilidade dos

filtros fibrosos foram observadas, devido a formação de tortas menos compactas e, portanto mais permeáveis.

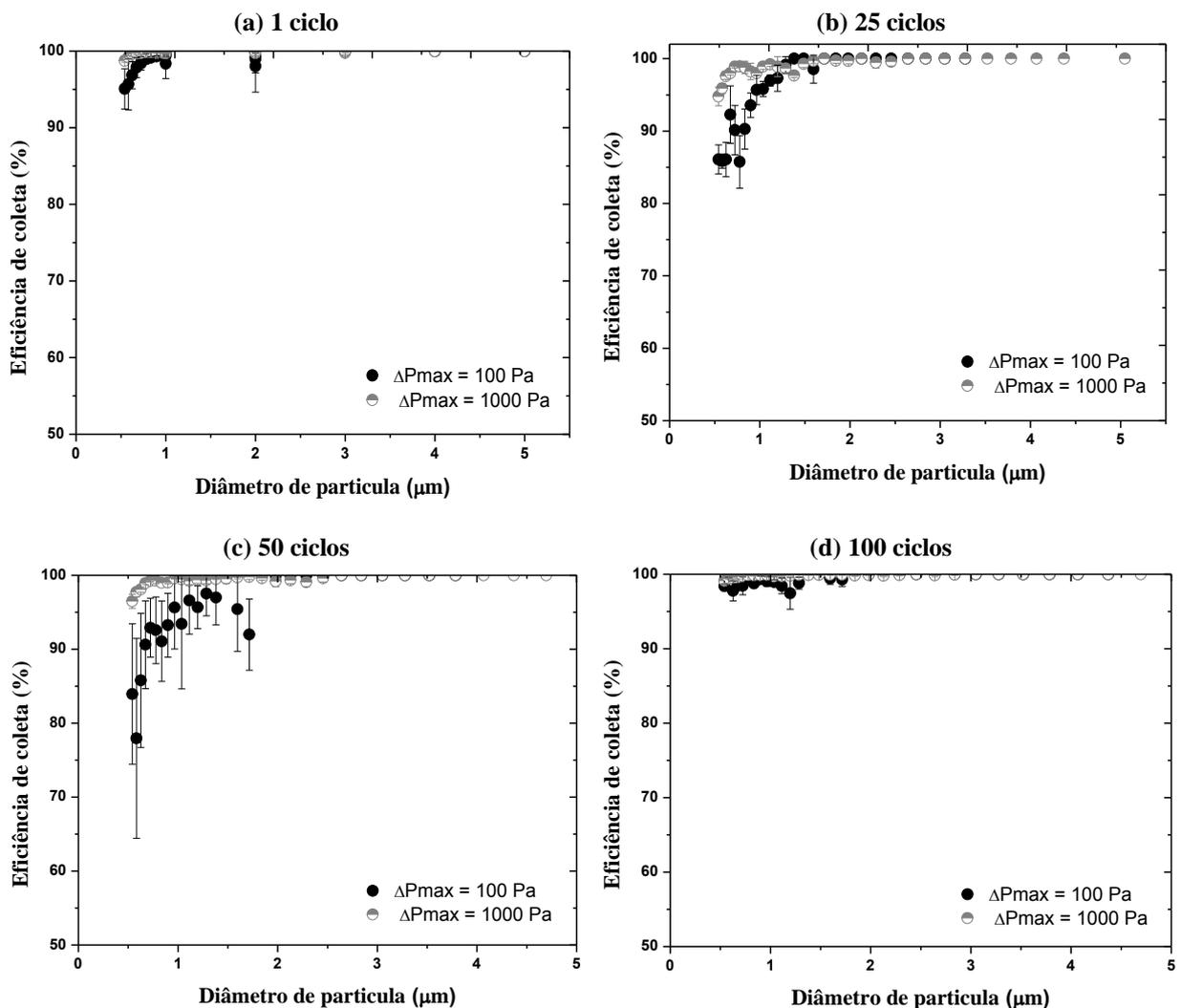
Tabela 5 - Permeabilidade dos meios filtrantes.

Meio filtrante	Poliéster	Poliéster
Queda de pressão máxima (Pa)	100	1.000
Permeabilidade após 1 ciclo (m^2)	$6,07 \times 10^{-12}$	$6,07 \times 10^{-12}$
Permeabilidade após 100 ciclos (m^2)	$9,10 \times 10^{-12}$	$9,10 \times 10^{-13}$

Fonte: Acervo pessoal, 2016.

Na Figura 50 estão apresentadas as eficiências de coletas do meio filtrante investigado após os seguintes ciclos de filtrações: (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos, (c) 50 ciclos e (d) 100 ciclos. Estes resultados foram determinados utilizando o procedimento experimental descrito no Capítulo 3.

Figura 50 - Eficiência fracionária de coleta dos filtros fibrosos após (a) 1 ciclo, (b) 25 ciclos, (c) 50 ciclos, (d) 100 ciclos de filtração por pulso de ar reverso.



Fonte: Acervo pessoal, 2016.

A análise da Figura 50 mostra que a eficiência de coleta do meio filtrante de fibras de poliéster (TCT-AP) foi 100% diâmetros superiores a 3 μm em todas as quedas de pressões máximas avaliadas. No entanto, o meio filtrante analisado apresentou-se mais eficiente na coleta de partículas de calcário dolomítico após a filtração aplicando 1.000 Pa de queda de pressão máxima, em relação a filtração utilizando a queda de pressão máxima 100 Pa. Este comportamento pode ser atribuído a maior retenção de partículas após a limpeza, observada por meio da maior massa retida e da maior queda de pressão residual. Desta forma, foi possível constatar que a eficiência de coleta do meio filtrante é de aproximadamente 100% utilizando a queda de pressão máxima em 1.000 Pa durante a filtração.

6.4 Considerações finais

Este capítulo apresentou uma comparação entre o comportamento do meio filtrante de fibras de poliéster utilizando diferentes valores de queda de pressão máxima, após 100 ciclos de filtrações por pulso de ar reverso.

Assim, verificou-se que, o meio filtrante de fibras de poliéster (TCT-AP) analisado, apresentou o maior período de filtração, a maior queda de pressão residual e a maior quantidade de massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso durante a filtração utilizando a queda de pressão máxima em 1.000 Pa, em relação a queda de pressão máxima de 100 Pa. No entanto, para os dois valores de queda de pressão máxima investigados, o acúmulo de material particulado foi mais acentuado no centésimo ciclo de filtração.

Observou-se que, a eficiência de limpeza foi alta para o primeiro ciclo de filtração (>65%) e apresentou-se um decréscimo de eficiência do meio filtrante nos ciclos subsequentes. Também foi observado um decréscimo da permeabilidade do meio filtrante investigado devido ao aumento do número de ciclos, principalmente durante a queda de pressão máxima de 1.000 Pa, confirmando que a massa retida após a limpeza interfere diretamente na permeabilidade do meio filtrante analisado.

A eficiência de coleta do meio filtrante de fibras de poliéster (TCT-AP) foi 100% para os diâmetros superiores a 3 μm em todas as quedas de pressões máximas avaliadas. No entanto, o meio filtrante analisado apresentou-se mais eficiente na coleta de partículas de calcário dolomítico após a filtração aplicando 1.000 Pa de queda de pressão máxima, em relação a filtração utilizando a queda de pressão máxima 100 Pa. Este comportamento pode ser atribuído a maior retenção de partículas após a limpeza, observada por meio da maior massa retida e da maior queda de pressão residual

CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DA DEPOSIÇÃO DE PARTÍCULAS APÓS A REGENERAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES

Este capítulo apresenta a análise da deposição de partículas em meios filtrantes de mesmo tratamento físico de superfície e confeccionados por fibras diferentes, e mostra os resultados relacionados ao desempenho destes filtros fibrosos na operação de filtração.

7.1 Introdução

A presença de partículas no interior do filtro fibroso, após a limpeza por pulso de ar reverso, contribui significativamente para o aumento da queda de pressão do ciclo subsequente. No entanto, a forma como estas partículas se acomodam no interior dos filtros fibrosos, ainda é pouco conhecida, assim como sua influência no desempenho dos meios filtrantes, apesar da penetração e a queda de pressão serem os aspectos mais importantes no desempenho dos filtros fibrosos (BAO et al., 2015).

Desta forma, este capítulo se propõe verificar a deposição de partículas de calcário dolomítico no interior dos meios filtrantes de fibras diferentes e com tratamentos físicos semelhantes, a fim de estudar a profundidade de deposição, o número e a quantidade de partículas depositadas no interior dos filtros fibrosos, após a limpeza utilizando o pulso de ar reverso. Além disso, será apresentada a relação das características dos meios filtrantes com os resultados da queda de pressão residual, da massa retida após a limpeza, da eficiência de limpeza, da eficiência de coleta e da permeabilidade destes filtros avaliados.

7.2 Materiais e métodos

Nesta seção, serão apresentados os materiais e os procedimentos experimentais adotados na operação de filtração e na análise da deposição de partículas em meios filtrantes de mesmo tratamento físico de superfície e confeccionados por diferentes fibras.

7.2.1 Materiais

O material particulado utilizado foi o calcário dolomítico, cuja caracterização encontra-se no Capítulo 4 (Seção 4.3.1).

Os meios filtrantes utilizados na filtração do calcário dolomítico foram dois filtros fibrosos diferentes, com uma das faces com acabamento. O meio filtrante A era composto por fibras de 100% poliéster, calandrado, termofixado e anti-pilling tipo Egg-Shell. O meio filtrante B era composto por fibras de 100% polipropileno, calandrado, termofixado, anti-pilling tipo Egg-Shell e imersão de PTFE (teflonado).

O filtro B é muito utilizado em aplicações que exigem uma filtração altamente eficiente. No entanto, o filtro A é geralmente 30% mais barato do que o filtro revestido com PTFE (SIMON et al., 2014).

7.2.2 Procedimentos experimentais

Na caracterização dos meios filtrantes foram obtidas imagens da superfície e da transversal utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (Philips XL – 30 MEV FEG). Mais informações sobre o procedimento adotado podem ser obtidas no Capítulo 3.

Os resultados de espessura permitiram a determinação da densidade dos elementos filtrantes, através da razão entre a gramatura e a espessura da amostra. Para essa determinação foi utilizada a gramatura fornecida pelo fabricante dos meios filtrantes (550 g/m^2).

Além disso, foram obtidas as rugosidades das superfícies, as porosidades e as densidades de empacotamento de cada amostra de filtros fibrosos avaliados. A rugosidade da superfície total foi medida por meio da Microscopia Óptica Confocal (*OLS 4100 da Marca Lext*), conforme apresentado na Seção 3.2.2.

A determinação da porosidade experimental dos meios filtrantes baseou-se no método proposto por Aguiar e Coury (1996). Este método consistiu na preparação de amostras dos meios filtrantes para serem observadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) por meio das seguintes etapas: pré-embutimento do tecido (o filtro foi encharcado com uma resina, Henkel PMS 10, que foi endurecido no forno por 48h a 60°C), seccionamento (o tecido endurecido foi cortado em pedaços de $1,0 \text{ cm}^2$), embutimento do tecido (os filtros foram embutidos pela resina Du Gel e pelo catalisador da marca Du Latéx), esmerilamento (as amostras embutidas foram lixadas por meio de lixas de carbetto de silício na sequência de 320, 600, 1200 e 2000 mesh) e polimento (utilizou-se uma politriz contendo um tecido de veludo, um sistema de irrigação e uma suspensão de alumina de $1 \mu\text{m}$).

Após estas etapas de preparação, as amostras foram metalizadas com ouro e foram obtidas cinco imagens em Microscopia Eletrônica de Varredura (Philips XL – 30 MEV FEG) de três regiões de cada filtro, de modo a contabilizar toda a profundidade do tecido. Essas

imagens foram analisadas pelo programa de análise de imagens *Image Pro Plus 7.0*, binarizando cada imagem, a fim de se obter um melhor contraste entre os poros e as fibras da amostra, proporcionando maior confiança na determinação da porosidade. Assim, a porosidade experimental do meio filtrante foi obtida pela Equação 23.

Os resultados de porosidade experimental dos meios filtrantes foram utilizados nos cálculos de densidade de empacotamento, considerando a fração de volume total do elemento filtrante efetivamente ocupada por fibras, utilizando a Equação 20.

Os experimentos de filtração foram conduzidos no equipamento de filtração por pulso de ar reverso. As características deste equipamento encontram-se no Capítulo 3 (Seção 3.3).

Os testes de filtração foram realizados mantendo-se constantes os parâmetros operacionais adotados dentro dos valores típicos utilizados em filtros de mangas industriais (Hesketh, 1996): a velocidade de filtração em 4 cm/s; a queda de pressão máxima ($\Delta P_{máx}$) em 1.000 Pa; o pulso de limpeza em tempo (t_p) de 200 ms e em pressão (P_p) de 2 kgf/cm². No entanto, limitou-se o número de ciclos (100 ciclos), devido a alguns parâmetros determinados com a operação interrompida (massa retida, eficiência de coleta, permeabilidade e análise da deposição das partículas). Todos os testes de filtração foram realizados em triplicatas (1, 25, 50, 75 e 100 ciclos).

Após o primeiro, o vigésimo quinto, o quinquagésimo, o septuagésimo quinto e o centésimo ciclo de filtração, as amostras dos filtros fibrosos utilizadas nas filtrações foram submetidas à análise de permeabilidade e de eficiência de coleta, conforme foi apresentado no Capítulo 3 (Figuras 13 e 15, respectivamente).

Além disso, as amostras dos filtros fibrosos submetidos ao primeiro, ao quinquagésimo e centésimo ciclo de filtração também foram submetidos ao procedimento desenvolvido por Aguiar e Coury (1996) para a determinação da deposição das partículas nos meios filtrantes. Os detalhes deste procedimento se encontram no Capítulo 3 (Seção 3.6).

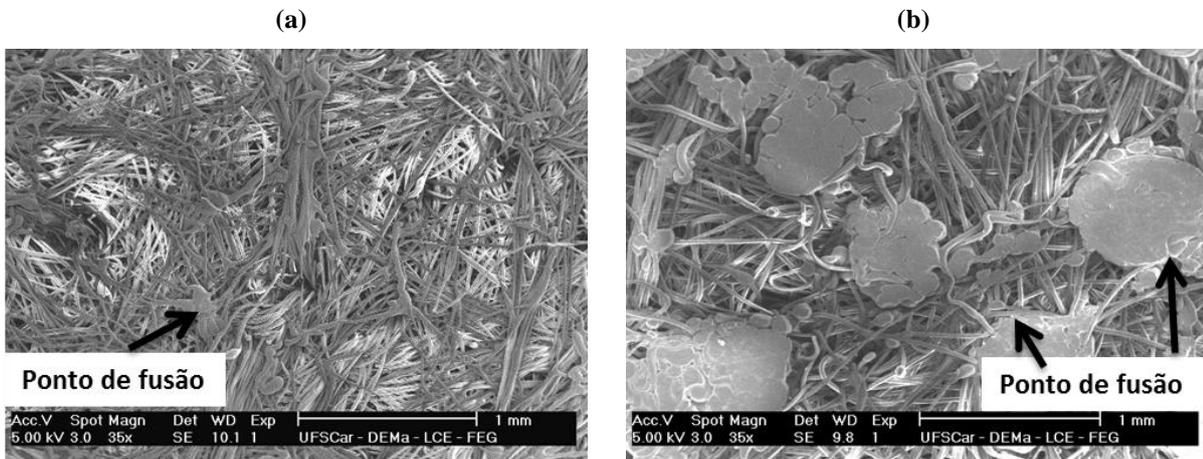
7.3 Resultados e discussão

Nesta seção, serão apresentados os resultados e discussões sobre a caracterização dos meios filtrantes, o desempenho dos mesmos durante a operação de filtração e a análise da deposição de partículas.

7.3.1 Caracterização dos filtros fibrosos

Na Figura 51 estão apresentadas as imagens obtidas em MEV das superfícies dos meios filtrantes (a) filtro A e (b) filtro B. Observa-se que, as imagens apresentaram diferenças de superfícies.

Figura 51 – MEV dos meios filtrantes com ampliação 35X (a) filtro A e (b) filtro B.



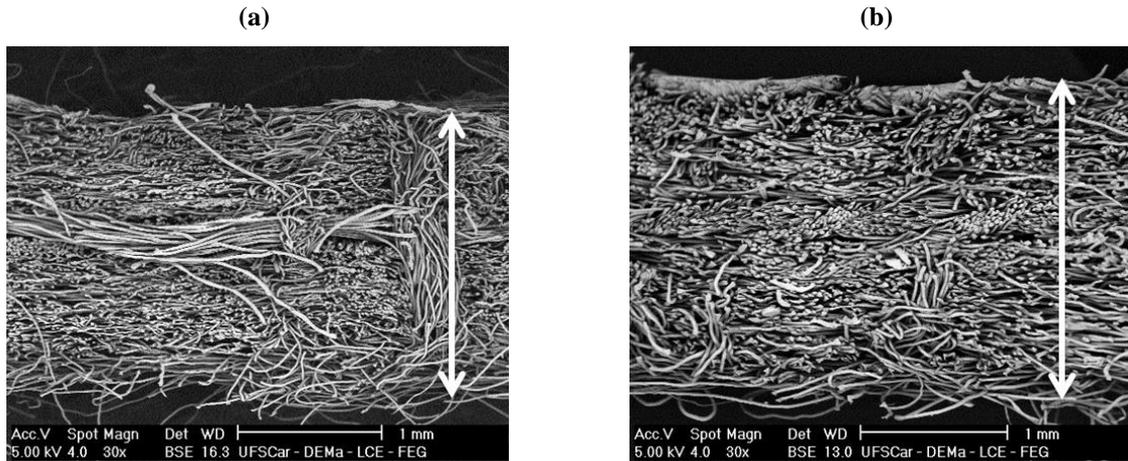
Fonte: Acervo pessoal.

A análise da Figura 51 mostra que as regiões de fusões na superfície das fibras de polímeros sintéticos foram perceptíveis nos dois filtros fibrosos analisados. Entretanto, na Figura 51 (b) notaram-se maiores fusões de fibras devido à presença de maiores regiões de fusões na superfície das fibras em relação à Figura 51 (a), que apresentou menores regiões de fusões na superfície.

Na Figura 52 são apresentadas uma das três imagens obtidas na transversal utilizadas na determinação da espessura dos filtros fibrosos (30x de ampliação). Observa-se uma diferença entre as superfícies dos meios filtrantes, submetida ao tratamento físico (região superior) e não submetida ao tratamento físico (região inferior). Deste modo, verificou-se que, a região superior submetida ao tratamento apresentou uma superfície mais uniforme, como era esperada.

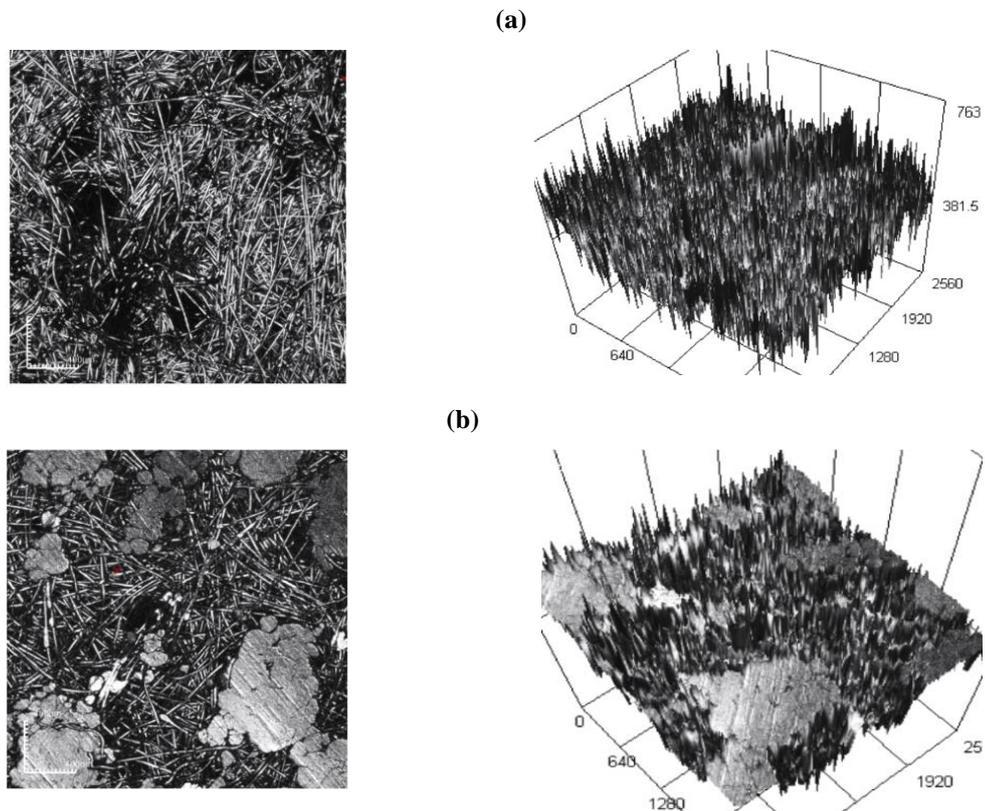
Na Figura 53, é apresentada uma das três imagens obtidas por meio da Microscopia Óptica Confocal durante a determinação da rugosidade dos filtros fibrosos.

Figura 52 – MEV dos meios filtrantes com ampliação 30 X (a) filtro A e (b) filtro B.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 53 – Imagens dos meios filtrantes em microscópio óptico, (a) filtro A e (b) filtro B.



Fonte: Acervo pessoal.

Os principais resultados das características dos meios filtrantes estão apresentados na Tabela 6. O acabamento mais uniforme foi observado no meio filtrante A (Figura 53 a) e este filtro proporcionou uma menor rugosidade da superfície total em relação ao filtro B (Figura 53 b). Na Figura 53 (b) foi observada com nitidez uma proporção significativa da superfície

do meio filtrante sem fusão das fibras, mostrando assim um tratamento não uniforme da superfície.

No entanto, na Tabela 6 é observado que, o meio filtrante A apresentou uma menor densidade, um menor diâmetro médio entre as fibras, menor porosidade e maior densidade de empacotamento em relação ao meio filtrante B.

Tabela 6 – Características dos meios filtrantes.

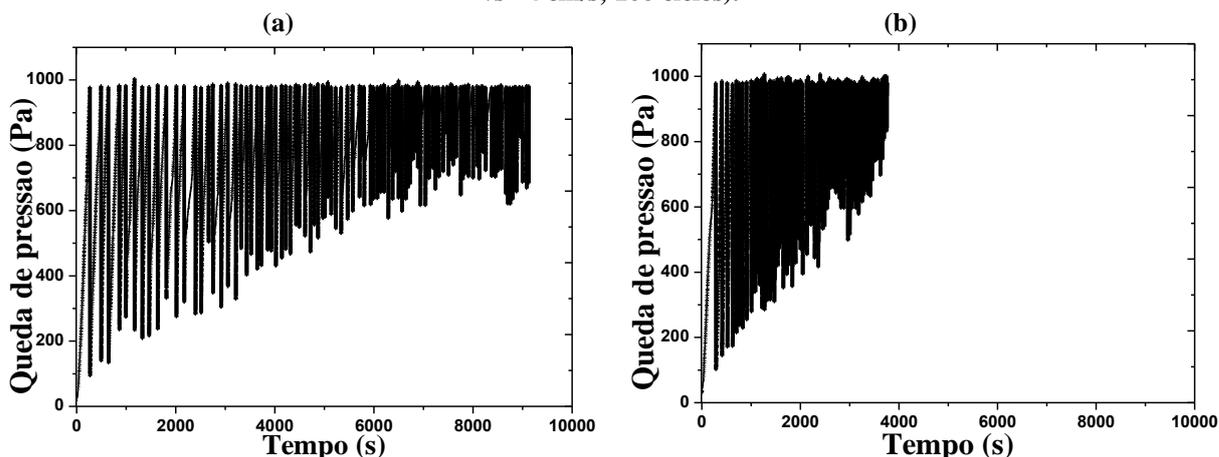
Meio filtrante	A	B
*Tratamento químico	Sem tratamento	Imersão de PTFE
*Tratamento físico	calandrado e termofixado, acabamento anti-pilling	calandrado e termofixado, acabamento anti-pilling
*Fibras [%]	100% poliéster	100% polipropileno
Diâmetro médio das fibras [μm]	16,50 ($\pm 1,20$)	22,10 ($\pm 2,32$)
*Gramatura [g/m^2]	550	550
*Permeabilidade [$\text{L}/\text{dm}^2/\text{min}$]	150	150
Espessura [mm]	1,77 ($\pm 0,02$)	1,89 ($\pm 0,06$)
Densidade [g/m^3]	$3,10 \times 10^5$	$2,91 \times 10^5$
Rugosidade [μm]	53,96 ($\pm 4,38$)	59,58 ($\pm 0,42$)
Porosidade experimental da seção transversal	0,77 ($\pm 0,024$)	0,81 ($\pm 0,017$)
Densidade de empacotamento	0,23	0,19
*Resistência à ruptura por tração transversal e longitudinal [N]	1100	1000

* Fornecido pelo fabricante.

7.3.2 Testes de filtração e limpeza

Na Figura 54 estão apresentados os resultados dos 100 ciclos de filtração utilizando os meios filtrantes: (a) filtro A e (b) filtro B. Os ensaios de filtração foram realizados em triplicata, porém para melhor observação foram apresentadas uma das curvas. Esses ensaios ocorreram em $28 (\pm 0,7) ^\circ\text{C}$ de temperatura média e em $36 (\pm 0,4) \%$ de umidade média do ar do ambiente.

Figura 54 – Ensaio de filtração (a) filtro A e (b) filtro B ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 100 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados da Figura 54 mostraram que o meio filtrante A apresentou maior tempo de filtração em relação ao filtro B. Os tempos médios de filtração para completar 100 ciclos foram de $9.569 \text{ s} \pm 445$ (filtro A) e $3.298 \text{ s} \pm 460$ (filtro B). Deste modo, o comportamento apresentado pelo meio filtrante A pode ser atribuído ao menor diâmetro médio de fibras, a menor porosidade e maior densidade de empacotamento avaliada, que facilitou a remoção das partículas depositadas no meio filtrante, devido a menor quantidade de espaços vazios entre as fibras, resultando assim, em ciclos de filtração mais longos.

Entretanto, avaliando os ciclos iniciais de filtração, também foi verificada uma diferença no tempo médio de filtração (média de três ensaios experimentais) para os filtros fibrosos analisados. Os tempos médios iniciais foram: $330 \text{ s} (\pm 64)$ e $230 \text{ s} (\pm 52)$ utilizando o meio filtrante A e o meio filtrante B, respectivamente.

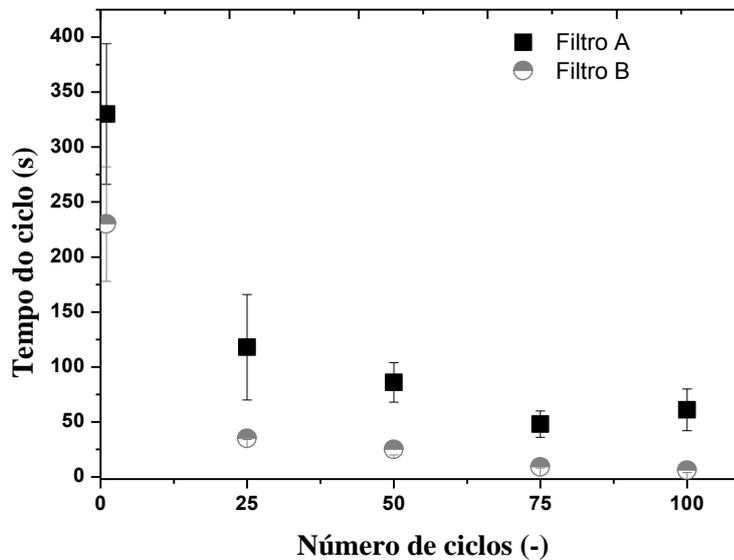
Na Figura 55 está representado o tempo médio de duração de cada ciclo em função do número de ciclos realizados.

Analisando a Figura 55, observou-se que, o tempo médio de filtração diminuiu à medida que houve um acréscimo no número de ciclos de filtração.

O primeiro ciclo de filtração apresentou maior tempo em relação aos ciclos subsequentes. Este comportamento pode ser observado devido à ocorrência da filtração de profundidade, em que se tem a presença da deposição interna de partículas entre os espaços vazios das fibras, dificultando a limpeza por pulso de ar reverso. No centésimo ciclo, o tempo de duração do centésimo ciclo foi de $61 \text{ s} (\pm 19)$ e de $6 \text{ s} (\pm 2)$ utilizando o meio filtrante A e o

meio filtrante B, respectivamente. Desta forma, verifica-se que o tempo de duração do ciclo utilizando o meio filtrante A foi maior que aplicando o meio filtrante B.

Figura 55 – Tempo de duração do ciclo em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 100 ciclos).



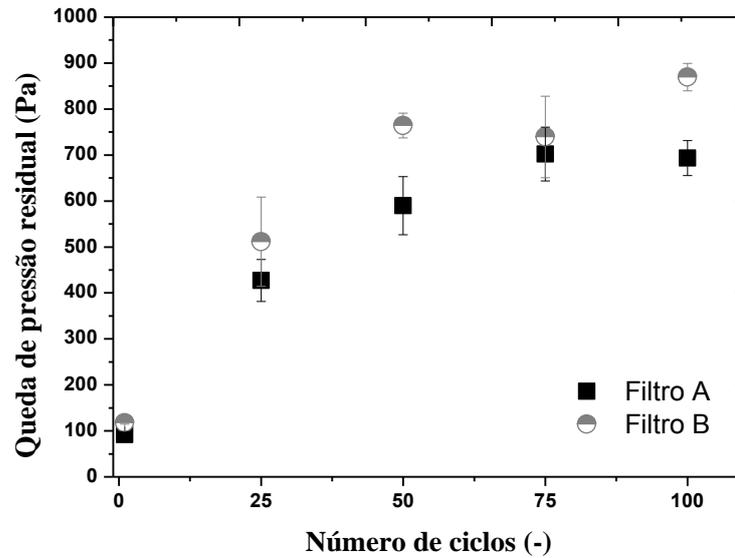
Fonte: Acervo pessoal.

A queda de pressão total aumenta, devido à deposição de partículas sobre a superfície do meio filtrante, com aumento do tempo de operação da filtração, tornando-se necessária a limpeza e observação da queda de pressão residual.

Na Figura 56, é apresentada a queda de pressão residual em função do número de ciclos de filtração. Observa-se que, à medida que aumentou o número de ciclos, aumentou-se a queda de pressão residual, utilizando os meios filtrantes analisados. Entretanto, o meio filtrante B apresentou uma maior queda de pressão residual, em relação ao meio filtrante A, uma vez que, para completar 100 ciclos, a queda de pressão residual foi de $643 \text{ Pa} (\pm 38)$ e de $870 \text{ Pa} (\pm 30)$, utilizando o meio filtrante A e B, respectivamente.

Assim, verifica-se que o meio filtrante B não facilitou à remoção das partículas em relação ao meio filtrante A, devido o valor acentuado da queda de pressão residual mostrado no último ciclo de filtração, próximo ao valor que representa a saturação total do meio filtrante.

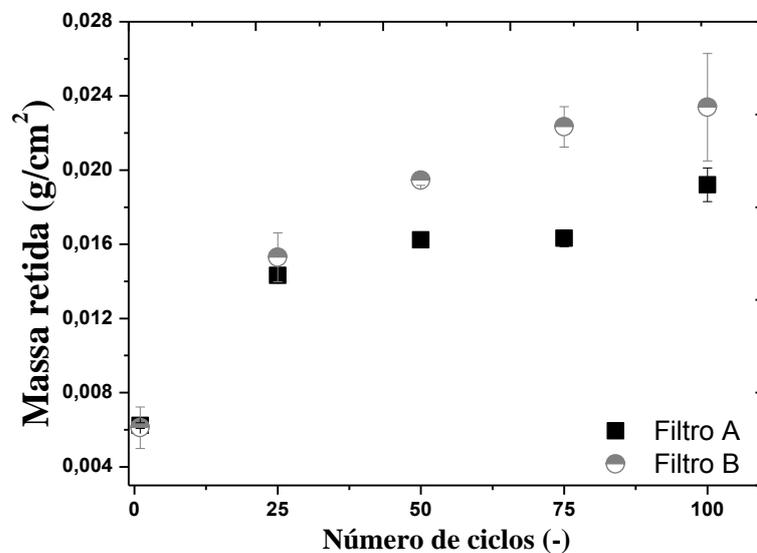
Figura 56 – Queda de pressão residual em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 100 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 57 está apresentada a massa retida após a limpeza por pulso de ar reverso em função do número de ciclos de filtração (1, 25, 50, 75 e 100 ciclos). Observou-se que, a massa retida nos filtros analisados aumentou em função do acréscimo dos ciclos de filtração. Além disso, verifica-se que o acúmulo de material particulado retido nos meios filtrantes analisados foi mais acentuado no centésimo ciclo de filtração, como era esperado.

Figura 57 – Massa retida em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 100 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

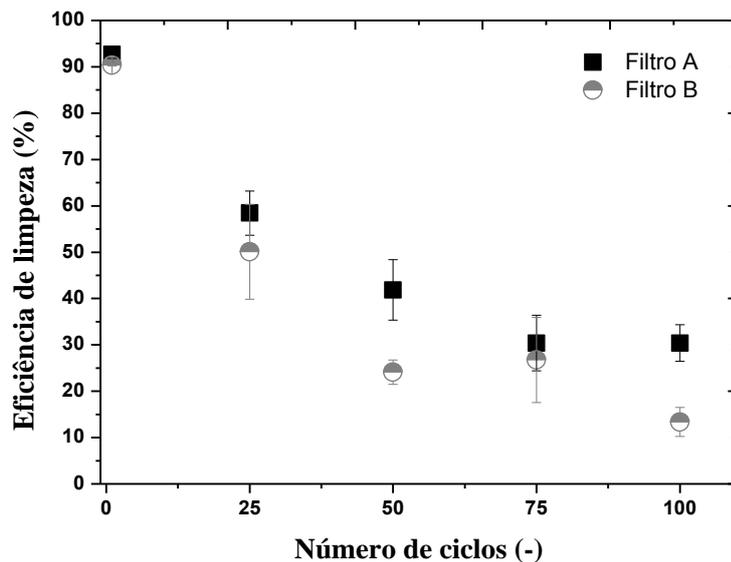
No entanto, constatou-se que, o meio filtrante B apresentou maior quantidade de massa retida após a limpeza em relação ao meio filtrante A. Isso pode ser atribuído ao menor diâmetro médio entre as fibras e a menor porosidade do meio filtrante A, que proporcionaram a menor quantidade de partículas retidas no interior do filtro.

Desta forma, os resultados podem implicar que a porosidade superficial do meio filtrante interfere na formação e na remoção da torta do filtro, ajudando ou impedindo a limpeza do tecido. Esses resultados confirmam os relatos de Tanabe et al. (2011), que maior porosidade superficial permite maior deposição de partículas, aumentando assim a massa retida.

7.3.3 Análises dos meios filtrantes

Na Figura 58, são apresentadas as eficiências de limpeza por pulso de ar reverso dos meios filtrantes avaliados. Estes resultados de eficiência foram obtidos por meio da Equação 17.

Figura 58 – Eficiência de limpeza em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 100 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

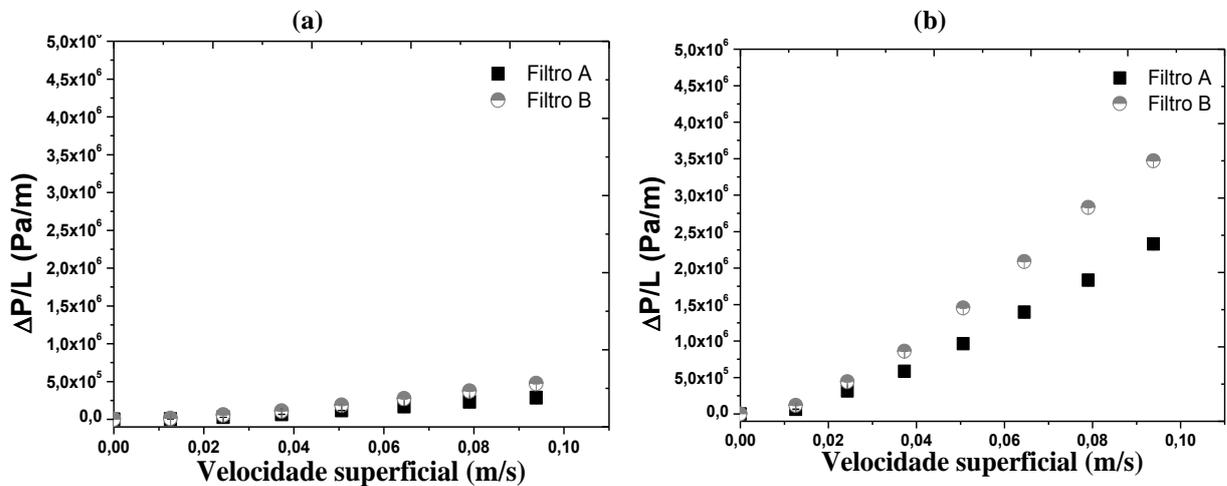
Observou-se que a eficiência de limpeza foi alta para o primeiro intervalo de limpeza ($\geq 90\%$) para os dois meios filtrantes investigados. Entretanto, mostrou-se uma tendência de decréscimo de eficiência com o aumento dos intervalos de limpeza, até $31\% (\pm 4)$ e $13\% (\pm 3)$ de eficiência de limpeza, como apresentado no meio filtrante A e no meio filtrante B, respectivamente. Em relação aos meios filtrantes, o meio filtrante A apresentou maior eficiência de limpeza após os 100 ciclos de filtração em relação ao meio filtrante B,

possivelmente consequência da menor retenção de partículas após a limpeza por pulso de ar reverso. Assim, constatou-se que, à medida que, se aumentou o número de ciclos de filtração, mais difícil foi à remoção das partículas depositadas no meio filtrante.

Os ensaios de permeabilidade dos filtros fibrosos foram realizados na unidade experimental apresentada no Capítulo 3 (Seção 3.5). Admitindo-se a Equação de permeabilidade Darciana (Equação 19), averiguou-se que, com o aumento da velocidade superficial do gás ocorreu conseqüentemente o aumento da queda de pressão no meio filtrante.

Na Figura 59, é apresentada a curva média dos três experimentos realizados, da queda de pressão (ΔP) sobre a espessura do meio filtrante (L) em função da velocidade superficial do gás, para os meios filtrantes investigados, após (a) o primeiro e (b) o centésimo ciclo de filtração.

Figura 59 – Velocidade superficial do gás em função da queda de pressão, obtida para a determinação da permeabilidade dos filtros fibrosos após (a) 1 ciclo e (b) 100 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

Os resultados apresentados na Figura 59, para os filtros fibrosos analisados, mostraram o acréscimo da queda de pressão em função do aumento da velocidade superficial do gás. É importante ressaltar que o filtro fibroso de polipropileno foi o que apresentou maior massa retida e maior queda de pressão residual, após a limpeza por pulso de ar reverso. Portanto, este foi o meio filtrante que teve os maiores valores de queda de pressão em todas as velocidades superficiais do gás.

Com os ajustes das curvas de queda de pressão em função da velocidade superficial no meio filtrante, obteve-se a permeabilidade.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados de permeabilidade dos meios filtrantes após o primeiro e o centésimo ciclo de filtração.

Tabela 7 – Permeabilidade dos meios filtrantes.

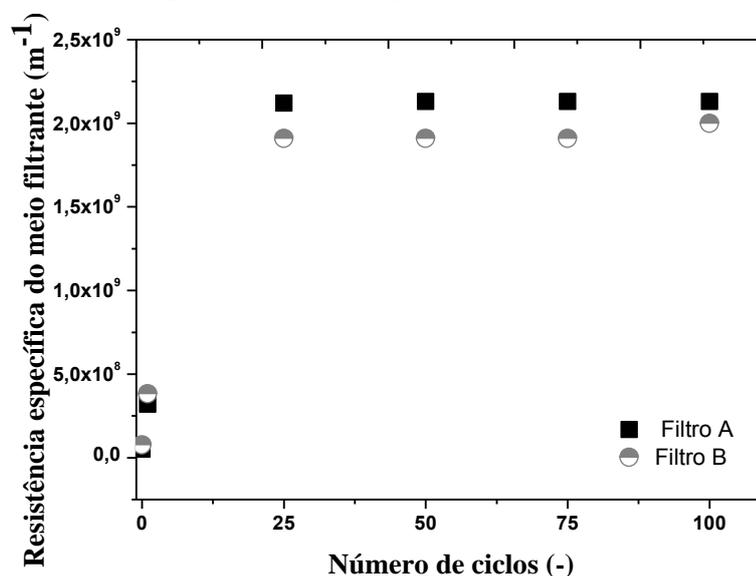
Filtro fibroso	A	B
Queda de pressão máxima (Pa)	1.000	1.000
Permeabilidade após 1 ciclo (m ²)	6,07 x 10 ⁻¹²	4,55 x 10 ⁻¹²
Permeabilidade após 100 ciclos (m ²)	9,10 x 10 ⁻¹³	6,07 x 10 ⁻¹³

Fonte: Acervo pessoal.

Verificou-se que, a permeabilidade dos meios filtrantes investigados, diminuiu com o aumento do número de ciclos, confirmando que a eficiência de limpeza foi dificultada com o acréscimo dos ciclos de filtração e interferiu diretamente na permeabilidade dos meios filtrantes. Constatou-se também que o meio filtrante B mostrou menor permeabilidade em relação ao meio filtrante A.

Na Figura 60 é apresentada a resistência específica dos meios filtrantes em função do número de ciclos de filtração. A resistência específica dos filtros foi calculada através da Equação 28. Observa-se que, a resistência específica média dos filtros aumentou linearmente em função dos ciclos de filtração. Também se averiguou que, apresentou quase constante em todos os meios filtrantes cuidadosamente avaliados após 25 ciclos, conforme era esperado. Este efeito também foi observado por Saleem et al. (2012).

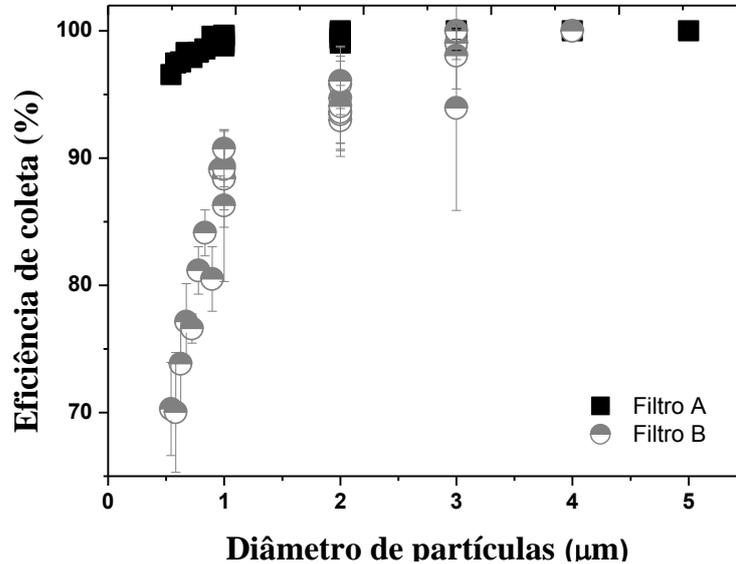
Figura 60 – Resistência específica do meio filtrante em função do número de ciclos de filtração ($\Delta P_{\text{máx}} = 1.000 \text{ Pa}$; $t_p = 200 \text{ ms}$; $P_p = 2 \text{ kgf/cm}^2$; $v_s = 4 \text{ cm/s}$; 100 ciclos).



Fonte: Acervo pessoal.

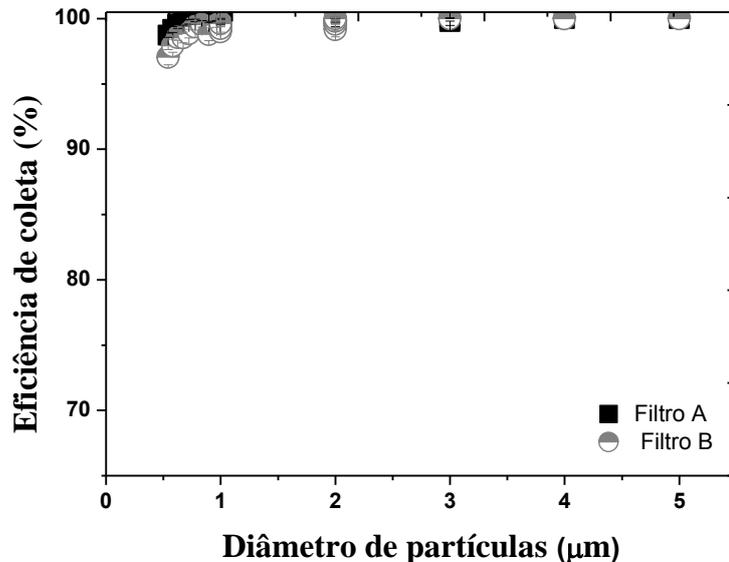
Um dos parâmetros mais importantes na filtração é a eficiência de coleta (PARK et al., 2012). Nas Figura 61 a Figura 66, são apresentadas as eficiências fracionárias de coleta dos meios filtrantes em função do diâmetro das partículas, nas condições de funcionamento: virgem e após os ciclos de filtração (1, 25, 50, 75 e 100 ciclos). A eficiência fracionária de coleta correspondeu ao intervalo de diâmetros de partícula de 0,54 a 5 μm .

Figura 61 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes virgens.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 62 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 1 ciclo de filtração.



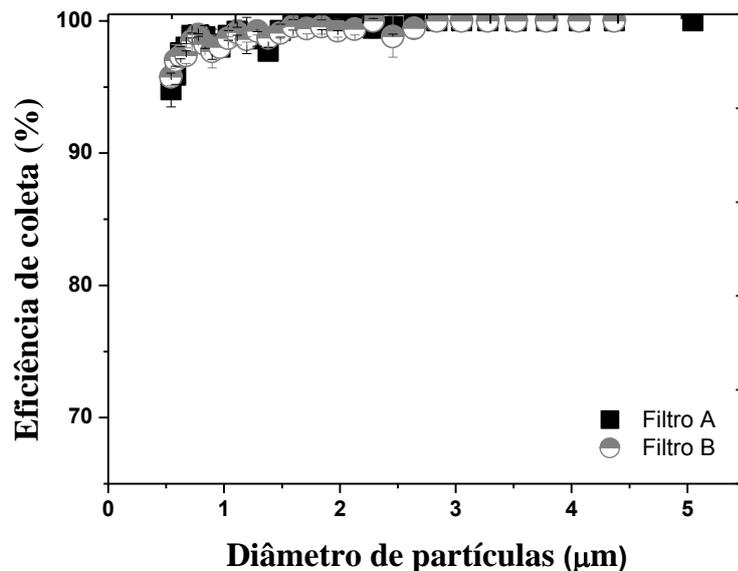
Fonte: Acervo pessoal.

Na Figura 61 observou-se que, o meio filtrante virgem mais eficiente na coleta de partículas de calcário dolomítico foi o filtro A, correspondendo a faixa de diâmetros aerodinâmicos menores que 4 μm , em relação ao meio filtrante B. Entretanto, para diâmetros

superiores a 4 μm , os dois meios filtrantes analisados apresentaram uma eficiência de coleta de 100%. Desta forma, os dois meios filtrantes (A e B) apresentaram altamente eficientes ($\approx 99\%$) para partículas acima de 4 μm .

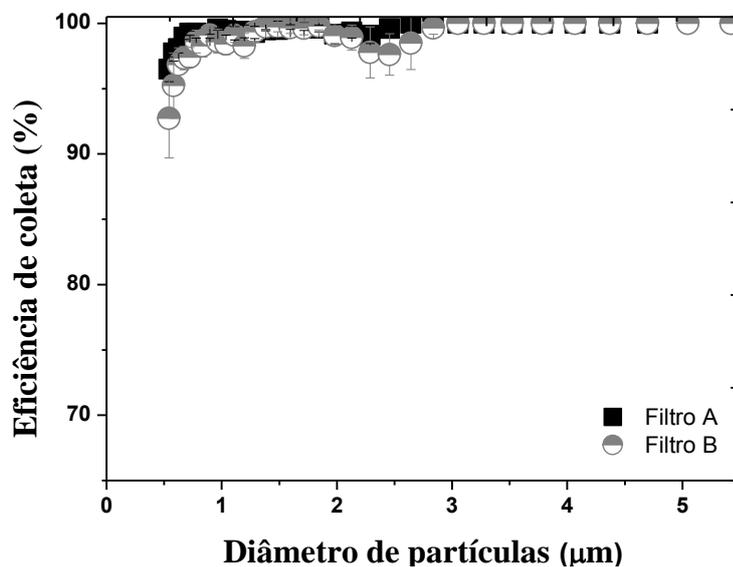
Verificou-se na Figura 62, após o primeiro ciclo de filtração, que a eficiência do meio filtrante B melhorou e mostrou praticamente semelhante do filtro A. Para partículas acima de 1 μm , as curvas de eficiência foram idênticas, apresentando quase 100% de eficiência. Neste caso, a camada de partícula retida após a limpeza foi responsável em coletar as partículas, aumentando assim, a eficiência dos meios filtrantes analisados. O mesmo comportamento é observado para 25 e 50 ciclos de filtração como mostram as Figuras 63 e 64.

Figura 63 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 25 ciclos de filtração.



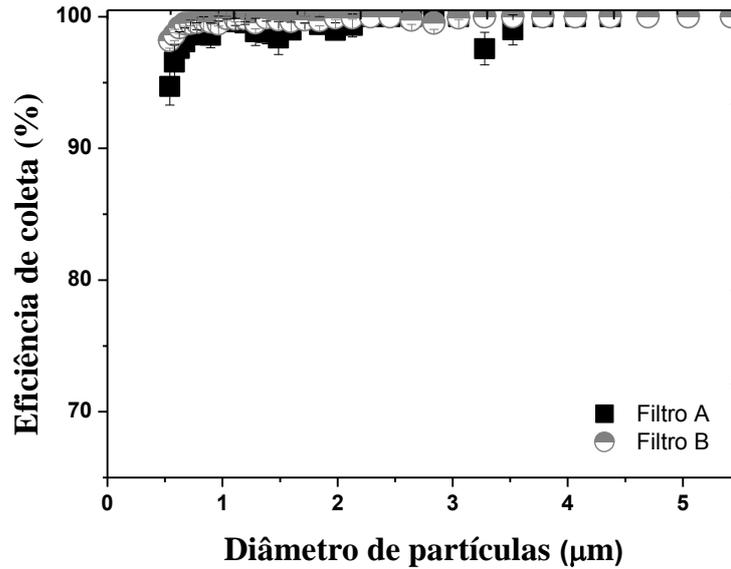
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 64 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 50 ciclos de filtração.



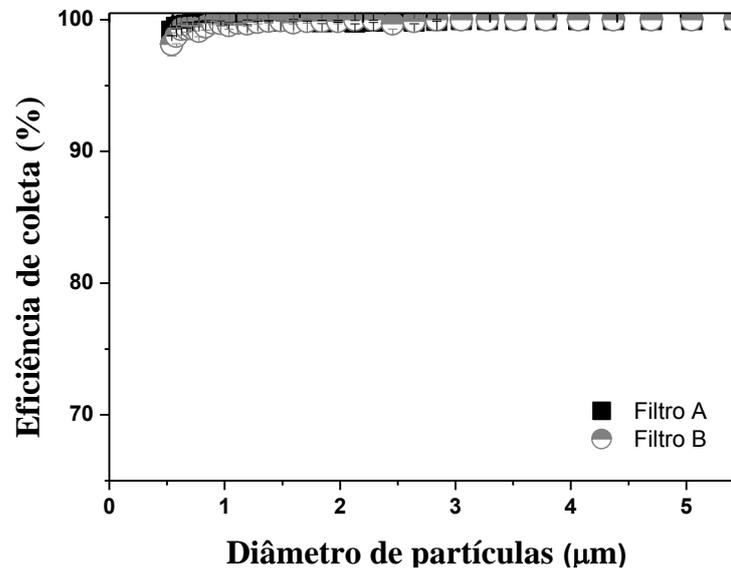
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 65 - Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 75 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 66 – Eficiência de coleta dos meios filtrantes após 100 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal

Entretanto, para o ciclo 75 (Figura 65), a eficiência do filtro A na coleta de partículas menores que 2 µm apresentou uma redução em relação ao filtro B. Assim, os meios filtrantes analisados, após os ciclos de filtração (1, 25, 50, 75 e 100 ciclos), apresentaram eficiências fracionárias de coletas superiores a 90%, comprovando que são altamente eficientes na coleta de partículas de calcário dolomítico. No entanto, o meio filtrante A apresentou maior eficiência de coleta quando virgem e após os ciclos de filtração, exceto após 75 ciclos de filtração.

O meio filtrante B apresentou um acréscimo de eficiência de coleta mais pronunciado em função do acréscimo dos ciclos de filtração, em relação ao meio filtrante A. O comportamento apresentado pelo meio filtrante B pode ser decorrente das partículas retidas após a limpeza por pulso de ar reverso, que desempenharam o papel do elemento coletor, auxiliando na coleta das partículas de calcário dolomítico.

Deste modo, observou-se que, à medida que ocorreu o acréscimo dos ciclos de filtração, aumentou-se a eficiência de coleta das partículas, principalmente pelo meio filtrante B, uma vez que, a eficiência de coleta foi notavelmente aumentada após a primeira regeneração por pulso de ar reverso.

Park et al. (2012) observaram que, o filtro composto por PTFE/Vidro apresentou alta eficiência de coleta para as partículas finas, porém as partículas muito pequenas ainda passaram por ele, mesmo após a estabilização da filtração. Entretanto, raramente foi observada penetração para partículas maiores que $0,725 \mu\text{m}$. À medida que as partículas foram carregadas na superfície do filtro, a penetração foi diminuída após a primeira limpeza, devido ao bloqueio de partículas nos vazios do meio filtrante, bem como a camada filtrante adicional de torta de pó na superfície do filtro. Contudo, a eficiência de coleta mostrou-se abaixo dos 90% na fase inicial e imediatamente após a limpeza do filtro, manteve-se estável para partículas de tamanhos de $0,45 \mu\text{m}$ a $2,5 \mu\text{m}$.

7.3.4 Análise da deposição de partículas

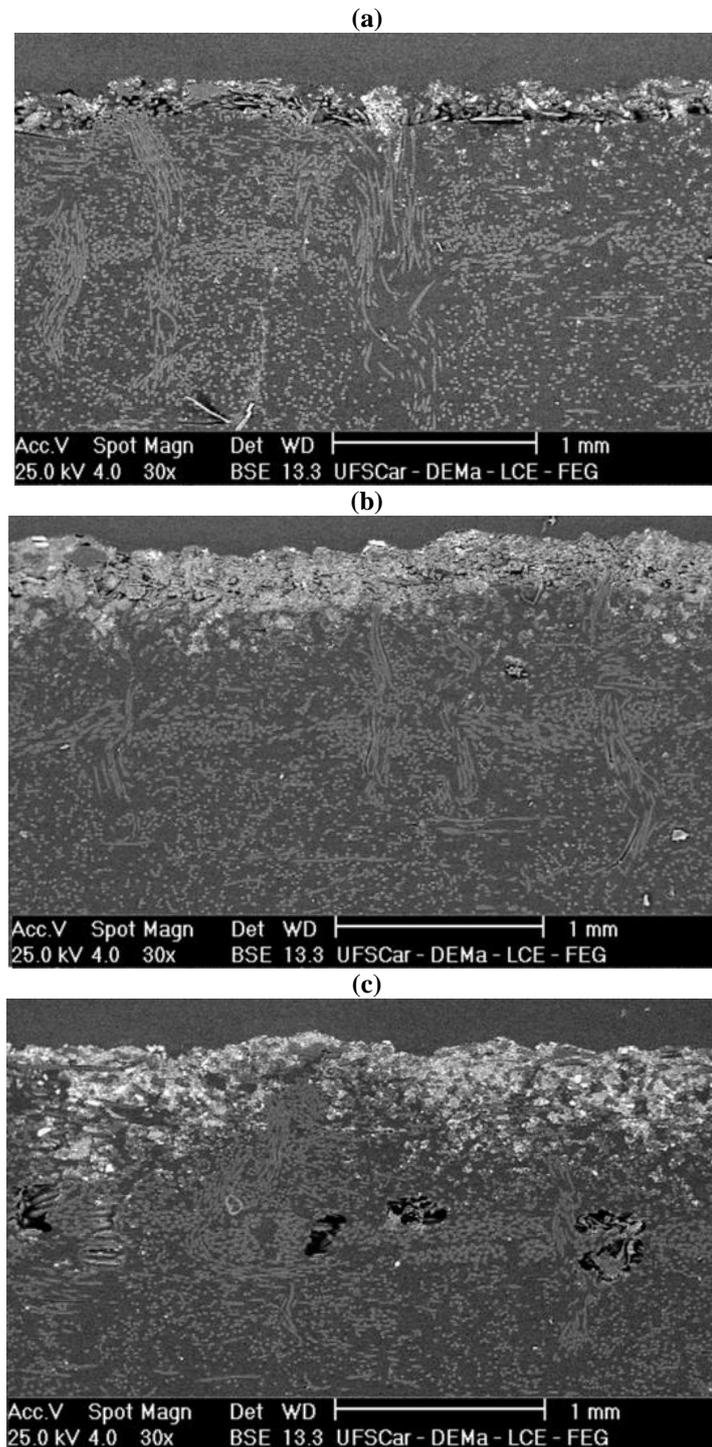
Nas Figuras 67 e 68 são mostradas as imagens obtidas em MEV-FEG das partículas depositadas nos meios filtrantes após os ciclos de filtração (1, 50 e 100 ciclos). Para determinação destas imagens, as amostras dos filtros fibrosos foram submetidas ao procedimento experimental, apresentado no Capítulo 3 (Seção 3.6).

A análise das Figuras 67 e 68 mostra que, a deposição das partículas de calcário dolomítico é mais pronunciada nas camadas próximas da superfície dos meios filtrantes avaliados, diminuindo a presença de partículas com a profundidade do meio filtrante.

Observa-se que, à medida que aumentou o número de ciclos de filtração mais partículas ficaram depositadas no interior e na superfície dos meios filtrantes analisados. O meio filtrante A apresentou mais partículas depositadas próximas à superfície em relação ao meio filtrante B, que se mostraram mais partículas depositadas no seu interior. Esse comportamento observado no meio filtrante B foi decorrente da maior porosidade apresentada quando virgem e da menor uniformidade do tratamento na superfície, proporcionando uma

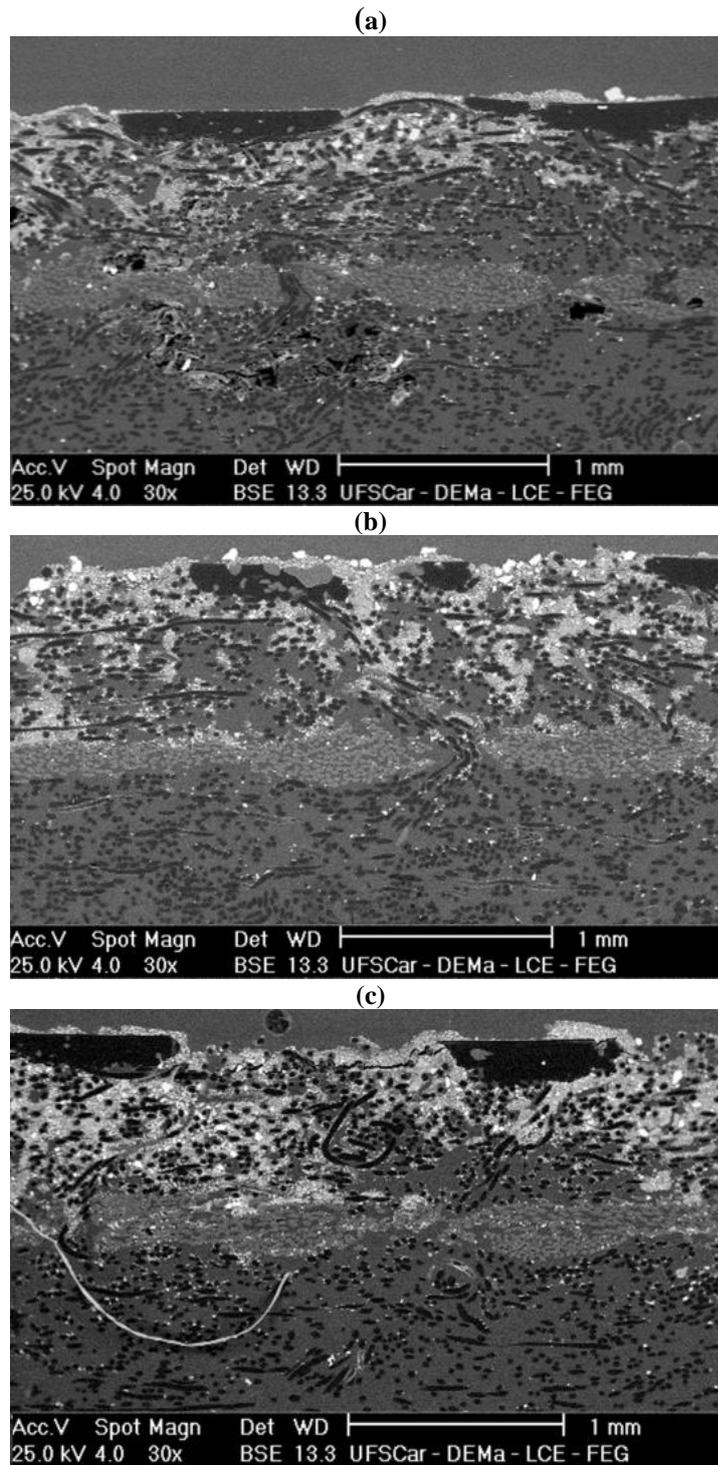
filtração de profundidade mais evidente e uma maior quantidade de partículas retidas no interior após a limpeza por pulso de ar reverso. Entretanto, no meio filtrante A foi mais pronunciada a filtração de superfície (captura de partículas na superfície), resultando assim na menor a penetração das partículas de calcário dolomítico.

Figura 67 – Imagens de MEV das partículas depositadas no meio filtrante A após (a) 1 ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

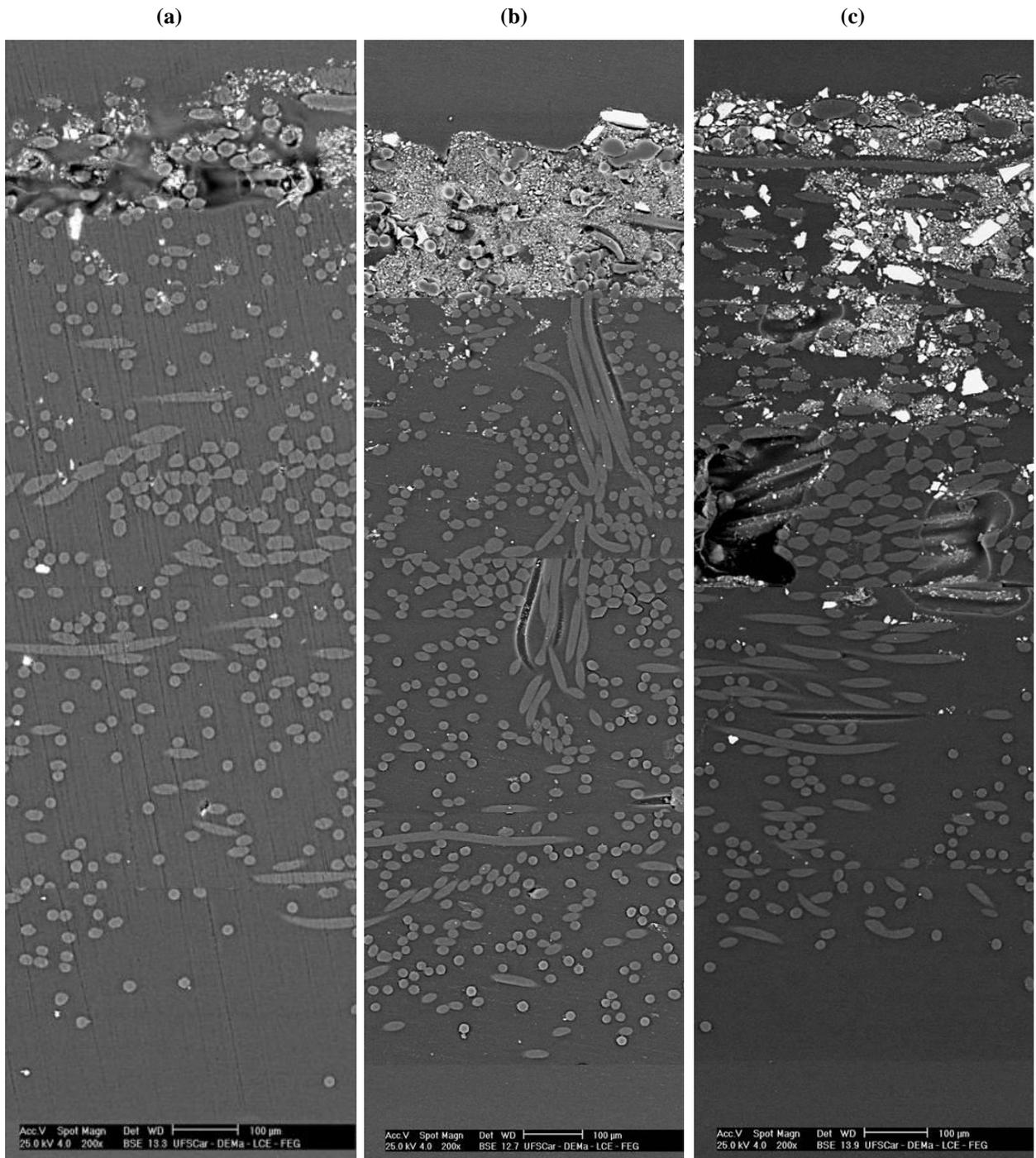
Figura 68 – Imagens de MEV das partículas depositadas no meio filtrante A após (a) 1 ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

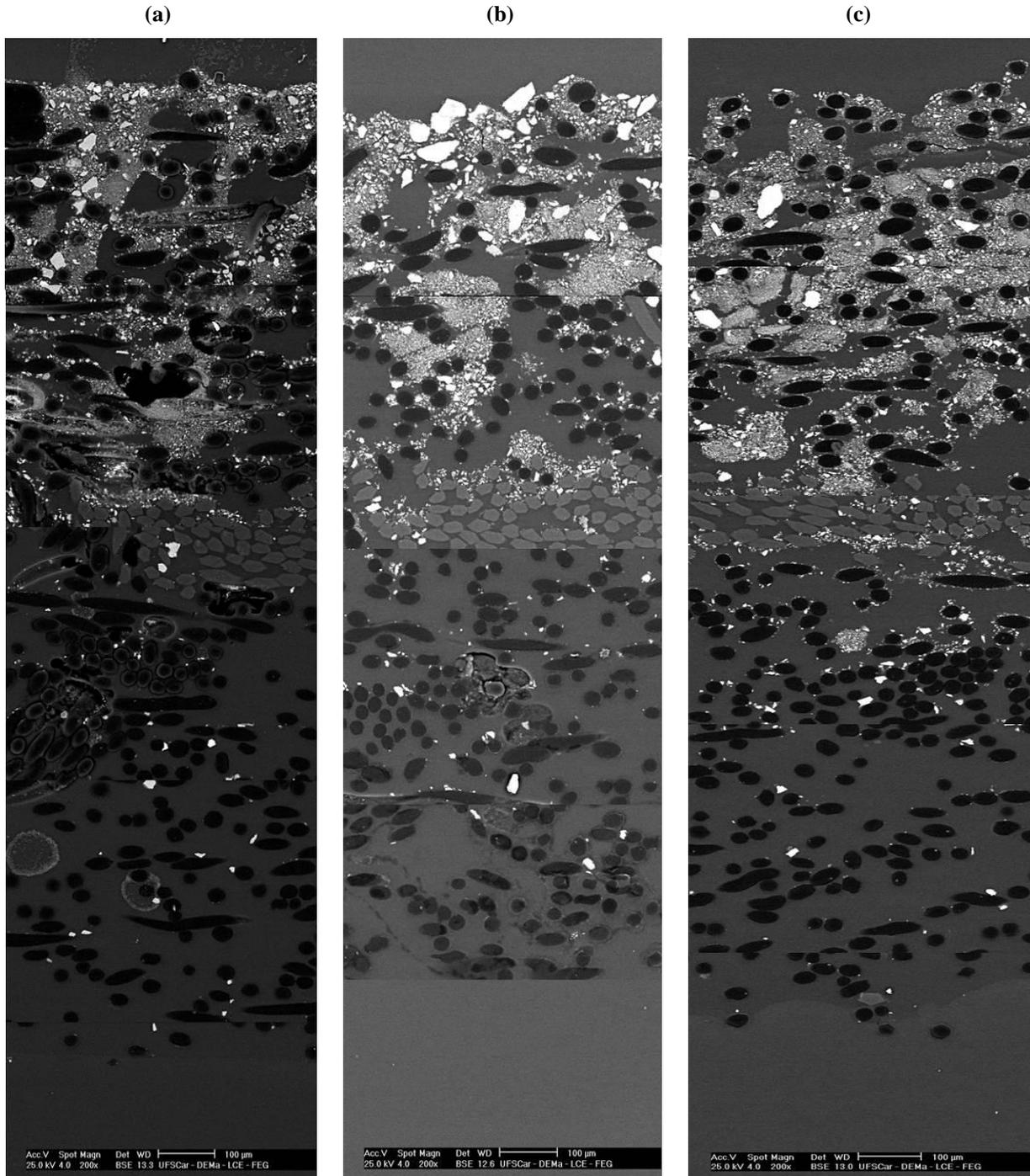
Nas Figuras 69 e 70 são mostradas algumas das imagens ampliadas de MEV (200x de ampliação) da distribuição das partículas depositadas dentro dos meios filtrantes após os ciclos de filtração (1, 50 e 100 ciclos), utilizadas na determinação da profundidade de deposição das partículas e do tamanho das partículas depositadas.

Figura 69 - Imagens de MEV de partículas de calcário dolomítico depositadas no interior do meio filtrante
A: (a) 1 ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração (com ampliação 200x).



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 70 - Imagens de MEV de partículas de calcário dolomítico depositadas no interior do meio filtrante B: (a) primeiro ciclo, (b) 50 ciclos e (c) 100 ciclos de filtração (com ampliação 200x).



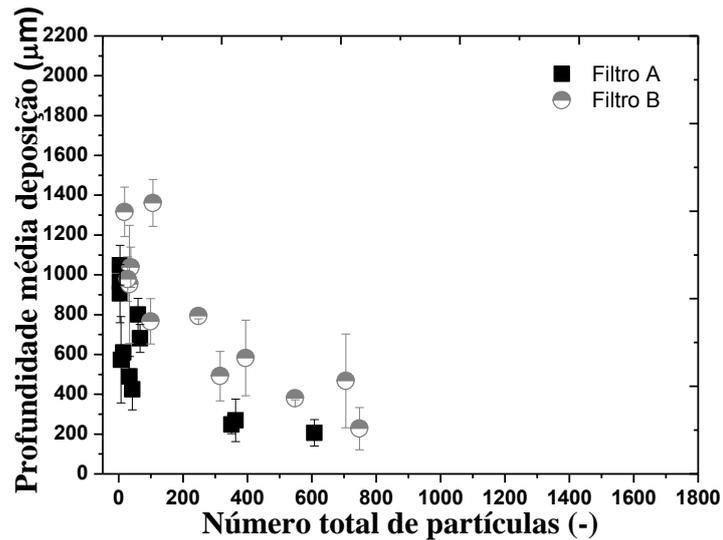
Fonte: Acervo pessoal.

Analisando as Figuras 69 e 70, também se observou que, o meio filtrante B apresentou maior profundidade de deposição de partículas de calcário dolomítico em relação ao meio filtrante A. Assim, constatou-se que, o meio filtrante A, além de ser mais eficiente na coleta de partículas de calcário dolomítico, em relação ao meio filtrante B, este filtro também

apresentou menor desgaste após os 100 ciclos investigado. Este comportamento pode ocorrer devido a maior eficiência de limpeza após os 100 ciclos de filtração devido a menor retenção de partículas após a limpeza por pulso de ar reverso.

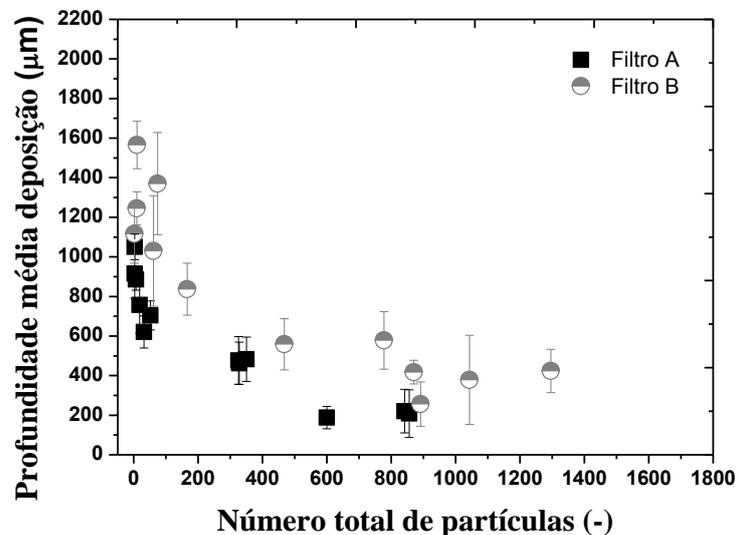
Nas Figuras 71-73 são apresentados os resultados do número de partículas depositadas nos meios filtrantes em função da profundidade de deposição das partículas após os ciclos de filtração por pulso de ar reverso.

Figura 71 – Número total de partículas em função da profundidade média de deposição das partículas após 1 ciclo de filtração.



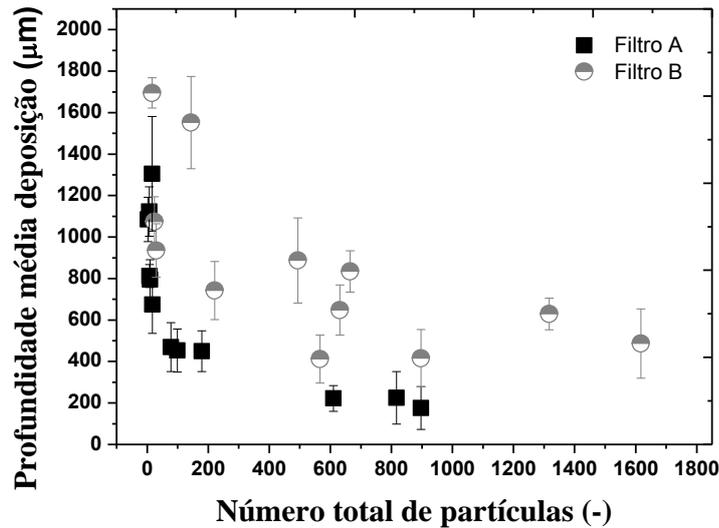
Fonte: Acervo pessoal.

Figura 72 – Número total de partículas em função da profundidade média de deposição das partículas após 50 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

Figura 73 – Número total de partículas em função da profundidade de deposição das partículas após 100 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

A análise das Figuras 71-73 mostrou o acréscimo do número de ciclos de filtração, influenciaram no aumento da profundidade de deposição das partículas e no número total de partículas, para os dois meios filtrantes analisados. Entretanto, no meio filtrante B, as partículas de calcário dolomítico apresentaram-se em maior número e em maior profundidade de deposição, em todos os ciclos investigados.

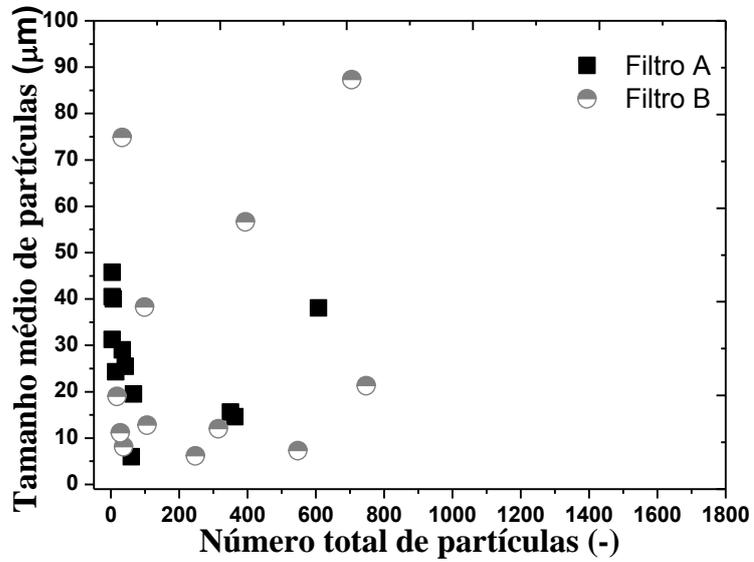
Nas Figuras 74-76 estão apresentados os resultados do número total de partículas em função do tamanho das partículas, para os seguintes ciclos de filtração: 1, 50 e 100 ciclos. Verifica-se que, à medida que aumentou o número total de partículas ocorreu a redução do tamanho das mesmas, para todos os meios filtrantes analisados. No entanto, o meio filtrante B apresentou maior tamanho de partículas depositadas em relação ao meio filtrante A, após todos os ciclos de filtração (1, 50 e 100 ciclos). Desta forma, constata-se que, o meio filtrante A foi mais eficaz na coleta de partículas mais finas.

Mukhopadhyay e Bawane (2015) verificaram que o meio filtrante de poliéster com PTFE apresentou facilidade para desalojar a torta de poeira durante a limpeza (devido à menor tendência de adesão do material), menor queda de pressão residual e foi o mais benéfico para capturar partículas muito finas.

Os resultados encontrados no trabalho de Mukhopadhyay e Bawane (2015) se assemelham com os resultados obtidos para o meio filtrante A de fibras de poliéster, porém este filtro tem o acabamento de superfície diferente. Isso pode ser atribuído a maior uniformidade da superfície do meio filtrante A, observada na Figura 51, mostrando assim

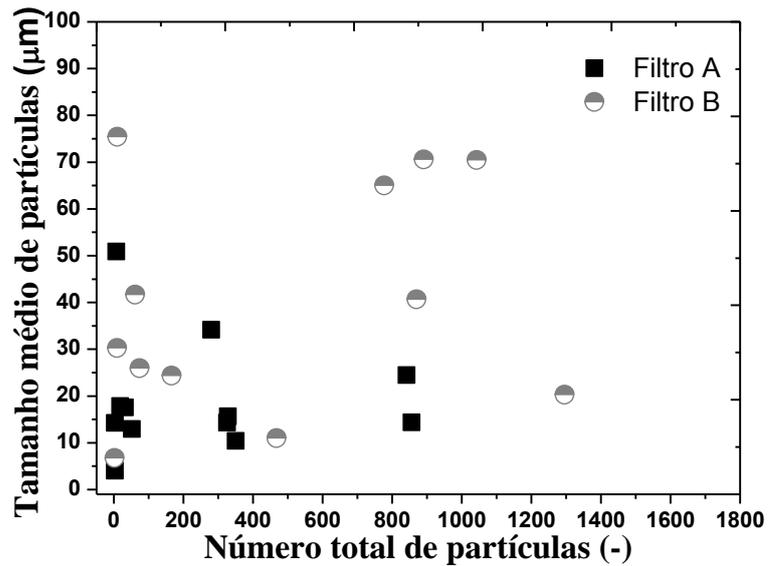
regiões com menor diâmetro médio entre as fibras e menor porosidade em relação ao meio filtrante B de fibras de polipropileno com o tratamento semelhante (imersão PTFE).

Figura 74 – Número total de partículas em função do tamanho médio de partículas depositadas após 1 ciclo de filtração.



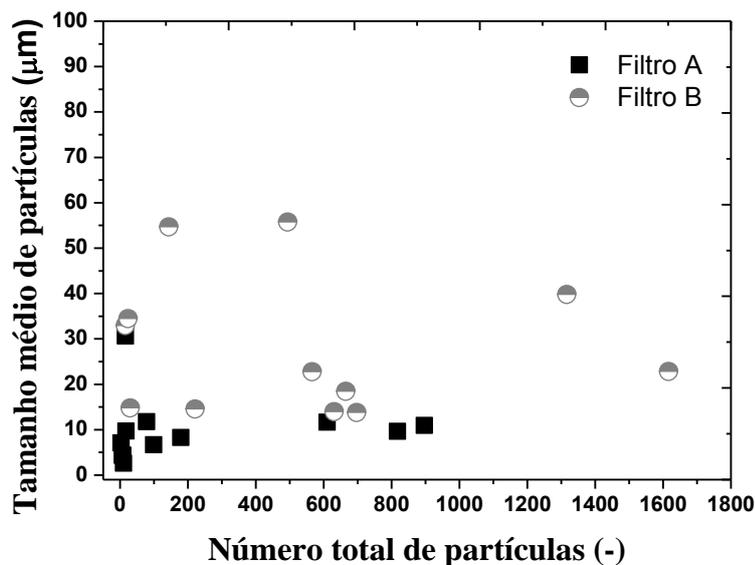
Fonte: Acervo pessoal, 2016.

Figura 75 – Número total de partículas em função do tamanho médio de partículas depositadas após 50 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal, 2016.

Figura 76 – Número total de partículas em função do tamanho médio de partículas depositadas após 100 ciclos de filtração.



Fonte: Acervo pessoal.

7.4 Considerações finais

Os meios filtrantes investigados apresentaram alta eficiência de limpeza nos ciclos iniciais, mas apresentou uma diminuição da eficiência com o aumento dos ciclos de filtração. Após os 100 ciclos de filtração, o meio filtrante A apresentou maior eficiência de limpeza, maior eficiência de coleta, menor retenção de partículas (menor número e menor profundidade de deposição de partículas), maior permeabilidade, menor queda de pressão residual e menor massa retida após a limpeza por jato de pulso em relação ao meio filtrante B. Consequentemente, pode-se constatar que, o meio filtrante A melhor combinou o desempenho da operação com a elevada eficiência de coleta e de limpeza.

Além disso, verificou-se que, o meio filtrante A coletou mais partículas na superfície, apresentando assim, uma mais pronunciada filtração superficial devido ao menor número e menor profundidade de deposição de partículas apresentado nos ciclos investigados, resultando, desta forma, na menor penetração das partículas de calcário dolomítico. Isto pode ser atribuído ao menor diâmetro médio entre as fibras e à menor porosidade em relação ao meio filtrante A, que proporcionou a menor quantidade de partículas retidas.

Deste modo, os resultados implicaram que a porosidade superficial do meio filtrante interferiu na formação e na remoção da camada de pó formada, ajudando ou impedindo a limpeza do tecido filtrante.

Também se observou que, à medida que o número total de partículas aumentava, ocorreu uma redução no tamanho das partículas depositadas para todos os meios filtrantes

analisados. No entanto, o meio filtrante B apresentou um tamanho de partícula maior do que o meio filtrante A, após os ciclos de filtração (1, 50 e 100 ciclos). Assim, constatou-se que, o meio filtrante A foi mais eficaz na coleta de partículas mais finas.

CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS POSTERIORES

Neste trabalho, visou-se à avaliação do desempenho dos tratamentos das superfícies dos meios filtrantes submetidos à filtração por pulso de ar reverso. Para cumprir este objetivo, foi feito um estudo em diferentes meios filtrantes submetidos à remoção de partículas micrométricas de calcário dolomítico.

Em primeira etapa, apresentada no Capítulo 4, observaram-se os parâmetros da operação de limpeza do meio filtrante (tempo e pressão do pulso) e verificaram que, os tempos de pulso analisados, 200 e 1.000 ms, não apresentaram grandes alterações nos valores de eficiência de limpeza e de queda de pressão residual. Assim, constatou-se que não há necessidade de utilizar tempos muito longos de pulso. Neste aspecto, sugere-se como continuidade da pesquisa observar a superfície do meio filtrante e relacionar com os outros parâmetros operacionais de filtração por pulso de ar reverso.

No Capítulo 5, as análises dos meios filtrantes de fibras de poliéster após submetidos a filtração por pulso de ar reverso, apresentaram que, o tratamento de superfície do meio filtrante (calandrado/chamuscado e calandrado/termofixado) influenciou no seu desempenho durante a operação de filtração. Desta forma, com base em ferramentas de análise mostradas neste trabalho, sugere-se como continuidade da pesquisa analisar os meios filtrantes de diferentes fibras e tratamentos de superfície, como meios filtrantes de fibras de acrílico com tratamentos de superfície baseados no revestimento por membranas de nanofibras.

No Capítulo 6, foi mostrado o comportamento do meio filtrante de fibras de poliéster (calandrado e termofixado) utilizando diferentes valores de queda de pressão máxima (100 Pa e 1.000 Pa), após 100 ciclos de filtrações por pulso de ar reverso. Observou-se que, o meio filtrante analisado em 1.000 Pa de queda de pressão máxima, apresentou uma maior queda de pressão residual e eficiência de coleta (aproximadamente 100% de eficiência de coleta). Este comportamento foi atribuído a maior retenção de partículas após a limpeza, como já era esperado.

No Capítulo 7, observou-se que, o meio filtrante de fibras de poliéster (calandrado e termofixado) apresentou maior eficiência de limpeza e de coleta, menor deposição de

partículas (menor número, tamanho e profundidade de deposição de partículas), maior permeabilidade, menor queda de pressão residual e menor massa retida após a limpeza por jato de pulso em relação ao meio filtrante de fibras de polipropileno com mesmo tratamento físico de superfície (calandrado e termofixado). Assim, constatou-se que o meio filtrante de poliéster melhor combinou o desempenho da operação com a elevada eficiência de coleta e de limpeza.

Por outro lado, existem outros meios filtrantes e outros aspectos da operação de filtração que podem ser analisados. Um deles está relacionado à porosidade experimental da torta de filtração. Neste aspecto e com base no trabalho de Aguiar e Coury (1996) sugere-se como continuidade da pesquisa observar a relação entre a porosidade experimental da torta de filtração e os diferentes tipos de tratamentos de superfície de meios filtrantes que tem sido desenvolvido atualmente. Além disso, sugere-se a verificação da influência da força de adesão no desempenho do meio filtrante durante a operação de filtração por pulso de ar reverso. Possivelmente, para tal finalidade será necessário um estudo aprofundado no trabalho desenvolvido por Morris et al (1987).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINT. Associação Brasileira das Indústrias de Não tecidos e Tecidos técnicos, 2016. Disponível em: <<http://www.abint.org.br/>>. Acesso em 10/10/2016.

AGUIAR, M.L. Filtração de ar em filtros de tecido. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1991.

AGUIAR, M. L.; COURY, J. R.; Cake formation in Fabric Filtration of Gases. *Industrial Engineering Chemical Research*, v.35, p.3673-3679, 1996. DOI: 10.1021/ie960042p

ANDERSEN, B.O., NIELSEN, N.F., WALTHER, J.H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters. *Powder Technology*. 291, 284–298, 2016. [doi:10.1016/j.powtec.2015.12.028](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.028)

BAO, B.; HE, W.; ZHAO, H.; XU, B.; LIN, Z. Modeling penetration through fibrous filter during dynamic filtration. *Aerosol and Air Quality Research*. 15, 648–656, 2015. doi: 10.4209/aaqr.2014.04.0081

BALGIS, R., KARTIKOWATI, C.W., OGI, T., GRADON, L., BAO, L., SEKI, L., OKUYAMA, K. Synthesis and evaluation of straight and bead-free nanofibers for improved aerosol filtration. *Chem. Eng. Sci.* 137, 947–954, 2015. [doi:10.1016/j.ces.2015.07.038](https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.07.038)

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

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

BARROS, P. M. Avaliação do desempenho de meios filtrantes fibrosos na remoção de partículas manométricas. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP, 2014.

BUONICORE, A. J.; DAVIS, W. T. Air Pollution Engineering Manual. Air & Waste Management Association. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.

CERON, L. P. Desenvolvimento de filtro cartucho de polimida para altas temperaturas com resina epóxi dgeba e novo agente de cura. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica. Porto Alegre/RS, 2012.

CIRQUEIRA, S.S.R.; TANABE, E.H.; AGUIAR, M.L. Evaluation of operating conditions during the pulse jet cleaning filtration using different surface treated fibrous filters. *Process Safety and Environmental Protection*. 105C, 69-78, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.010>

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*, 16, 306-313, 2008

CHENG, Y-H.; TSAI, C-J. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. *Aerosol Science and Technology*, 29:4, 315-328, 1998. Doi 10.1080/02786829808965572

CHEN, C.-C.; CHEN, W.-Y.; HUANG, S.-H.; LIN, W.-Y.; KUO, Y.-M.; JENG, F.- T. Experimental study on the loading characteristics of needlefelt filters with micrometer-sized monodisperse aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 34:262–273, 2001

COURY, J. R. Electrostatic effects in granular bed filtration of gases. Tese (Doutorado). Cambridge University. Inglaterra, 1983.

CUIPING, Y.; GUIJIAN, L.; HAIYAN, C. Effect of induced airflow on the surface static pressure of pleated fabric filter cartridges during pulse jet cleaning. *Powder Technology*, 249, 424-430, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.09.017>

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

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

DIAS, C.M.F. Design de estruturas fibrosas híbridas para aplicação técnica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Têxtil). Universidade do Minho. Minho, 2009.

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

DUNNETT, S.J. AND CLEMENT, C.F. A Numerical Study of the Effects of Loading from Diffusive Deposition on the Efficiency of Fibrous Filters. *J. Aerosol Sci.* 37: 1116–1139, 2006.

ELLENBECKER, M. J.; LEITH, D. The effect of dust retention on pressure drop in a high velocity pulse-jet fabric filter. *Power Technology*, 25, 147-154, 1980.

ELLENBECKER, M.J.; LEITH, D. Dust removal characteristics of fabrics used in pulse-jet filters. *Powder Technology*, 36, 13-19, 1983.

FU, Y.; FU, H.; ZHU, H. Visualization of the particle dendrite deposition phenomenon by using computer technology. *Open Access Library Journal*, 1, 1-8, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/oalib.1100557>

FOTOVATI, S.; VAHEDI TAFRESHI, H.; POURDEYHIMI, B. A macroscale model for simulating pressure drop and collection efficiency of pleated filters over time, *Separation and Purification Technology* 98, 344–355, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2012.07.009>

HARDMAN, E. Filter media selection, science or black art? *The Journal of the Filtration Society*, v.1, 2001.

HESKETH, H. E. Air pollution control. Traditional and Hazardous Pollutants - Revised Edition, 1996.

HINDS, W. C. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. 2^a ed. 1998.

HINDY, K.T. Influence of selected fixed parameters on pulse-jet fabric filter operation. *Atmospheric Environment*, v.20, n^o8, 1517-1521, 1986. [http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981\(86\)90240-4](http://dx.doi.org/10.1016/0004-6981(86)90240-4).

HINDY, K.T., SIEVERT, J., LOFFER, F. Influence of cloth structure on operational characteristics of pulse-jet cleaned filter bags. *Environ. Int.* 13, 175–181, 1987. [http://dx.doi.org/10.1016/0160-4120\(87\)90087-0](http://dx.doi.org/10.1016/0160-4120(87)90087-0).

HSIAO, T-C., CHEN, D-R. Experimental observations of the transition pressure drop characteristics of fibrous filters loaded with oil-coated particles. *Sep. Purif. Technol.* 149, 47–54, 2015. [doi:10.1016/j.seppur.2015.05.029](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.029)

JIANG, D., ZHANG, W., LIU, J., GENG, W., REN, Z. Filtration and regeneration behavior of polytetrafluoroethylene membrane for dusty gas treatment. *Korean J. Chem. Eng.* 25 (4), 744–753, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s11814-008-0122-2>.

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

KOCH, M. Cake filtration modeling – Analytical cake filtration model and filter medium characterization. Thesis for the degree of philosophiae doctor. Faculty of Engineering Science and Technology. Department of Energy and Process Engineering, Trondheim, 2008.

KOCH, M.; KRAMMER, G. Filter performance with non-uniformly distributed concentration of dust-evidence from experiments and models. *Powder Technology*. 292, 149-157, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.01.020>

KIM, J-H.; KIM, Y-C.; CHOI, J-H. Characteristics of pressure drop during the pulse-jet cleaning of a ceramic filter for high temperature and high pressure. *Korean J. Chem. Eng.*, 33(2), 726-734, 2016. DOI: 10.1007/s11814-015-0211-y

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters. *Aerosol Science and technology*, v. 1, 147-166, 1982. <http://dx.doi.org/10.1080/02786828208958584>

LEE, K., SOHN, J-R., PARK, Y.O. Filtration performance characteristics of ceramic candle filter based on inlet structure of high-temperature and high-pressure dust collectors. *J. Ind. Eng. Chem.* 21, 101-110, 2015. doi:10.1016/j.jiec.2014.09.004

LI, W., SHEN, S., LI, H. Study and optimization of the filtration performance of multi-fiber filter, *Adv. Powder Technol.*, 2016. [doi:10.1016/j.apt.2016.02.018](http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2016.02.018)

LI, Q.; ZHANG, M.; QIAN, Y.; GENG, F.; SONG, J.; CHEN, H. The relationship between peak pressure and residual dust of a pulse-jet cartridge filter. *Powder Technology*, 283, 302-307, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.05.038>

LÖFFLER, F.; DIETRICH, H.; FLATT, W. Dust Collection with bag and Envelop Filters, Fried Vieweg and Sons, Braunschweig, Germany, 1988.

LO, L.M., CHEN, D.R, PUI, D.Y.H. Experimental study of pleated fabric cartridges in a pulse-jet cleaned dust collector. *Powder Technol.* 197, 141–149, 2010. [doi:10.1016/j.powtec.2009.09.007](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2009.09.007)

LUPION, M.; ALONSO-FARIÑAS, B.; RODRIGUEZ-GALAN, M.; NAVARRETE, B. Modelling pressure drop evolution on high temperature filters. *Chemical Engineering and Processing* 66, 12-19, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2013.01.010>

MATTESON, M. J.; ORR, C. Filtration: principles and practices. 2^a ed, Editora Dekker. New York, 1987.

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

MIGUEL, A. F. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. *Aerosol Science* 34, 783-799, 2003. [doi:10.1016/S0021-8502\(03\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00027-2)

MORRIS, K.; ALLEN, R.W.K.; CLIFT, R. Adhesion of cakes to filter media. *Filtration & Separation*, 1987.

MÜLLER, D. Desenvolvimentos de filtros cerâmicos fibrosos para gases a altas temperaturas. 12p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MUKHOPADHYAY, A.; PANDIT, V. Control of industrial air pollution through sustainable development. *Environ. Dev. Sustain.* 16:35-48, 2014. DOI 10.1007/s10668-013-9473-x

MUKHOPADHYAY, A.; BAWANE, H.S. Emission of fine particles and ageing behavior of PTFE finished filter media during industrial pollution control. *Environment and Pollution*, v.4, n.4, 2015. [doi:10.5539/ep.v4n4p58](https://doi.org/10.5539/ep.v4n4p58)

MUKHOPADHYAY, A.; PANDIT, V.; DHAWAN, K. Effect of high temperature on the performance of filter fabric. *Journal of Industrial Textiles*, 2015. DOI: 10.1177/1528083714567240

NÓBREGA, S. W. Filtração de gases em filtros de tecido: remoção da torta por impulso mecânico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1992.

PACHECO, T.A. Tecnologia de filtro manga combate poluição atmosférica. Revista Meio filtrante. Julho, 2013. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/noticiaInt.asp?id=6207>. Acesso em 01 de dezembro de 2016.

PAYATAKES, A. C.; TIEN, C. Particle deposition on fibrous media with dendrite-like pattern: a preliminary model. *Journal of Aerosol Science*. V.7, 85-100, 1976.

PARK, B. H.; KIM, S. B.; JO, Y. M.; LEE, M-H. Filtration characteristics of fine particle matters in a PTFE/Glass composite bag filter. *Aerosol and Air Quality Research*, 12:1030-1036, 2012. doi: 10.4209/aaqr.2012.03.0071

QIAN, Y.; BI, Y.; ZHANG, Q.; CHEN, H. The optimized relationship between jet distance and nozzle diameter of a pulse-jet cartridge filter. *Powder Technology*, 266, 191-195, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.06.004>

QIAN, Y.; BI, Y. ZHANG, M.; CHEN, H.; XU, G. Effect of filtration operation and surface treatment on pulse-jet cleaning performance of filter bags. *Powder Technology*, 277, 82-88, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.02.036>

QIAN, F.P..YU, X.K. Numerical simulation to study the effect of the particle deposition morphology on the filtration efficiency of the fibrous media, *Adv. Mater. Res.* 518–523, 1767–1770, 2012. Doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.1767

RAMARAO, B.V.; TIEN, C. Calculations of drag forces acting on particle dendrites. *Aerosol Science and Technology*, 8:1, 81-95, 1988. DOI:10.1080/02786828808959172

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 (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia/MG, 2010.

RODRIGUES, M.V. Determinação da carga eletrostática em aerossóis e seu efeito na filtração de gases. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2005.

RODRIGUES, K. B. Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2006.

SALEEM, M., KRAMMER, G., KHAN, R.U., TAHIR, M.S. Influence of operating parameters on cake formation in pilot scale pulse-jet bag filter. *Powder Technol.* 224, 28–35, 2012. doi:[10.1016/j.powtec.2012.02.016](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.02.016)

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. *J. Hazard. Mater.* 144, 677–681, 2007. doi:[10.1016/j.jhazmat.2007.01.094](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.01.094)

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. “Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema Al₂O₃-SiC.” *Cerâmica*, v.46, p. 97-103, 2000.

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

SCHMIDT, E. Experimental Investigations into the Compression of Dust Cakes Deposited on Filter Media. *Filtr. Sep.* 32: 789–793, 1995.

SCHMIDT, E. Simulation of three-dimensional dust structures via particle trajectory calculations for cake-forming filtration. *Powder Technol.* 56, 113-117, 1996.

SCHMIDT, E. Theoretical Investigations into the Compression of dust Cakes Deposited on Filter Media. *Filtr. Sep.* 34: 365–368, 1997.

SCHMIDT, E.; LÖFFLER, F. Preparation of Dust Cakes for Microscopic Examination. *Powder Technol.* 60: 173–177, 1990.

SCHMIDT, E.; LÖFFLER, F. The Analysis of Dust Cake Structures. Part. Part. Syst. Char. 8: 105–109, 1991.

SCHILLER, S.; SCHMID, H-J. Highly efficient filtration of ultrafine dust in baghouse filters using precoat materials. *Powder Technology*, 279, 96-105, 2015.

SILVA, C.R.N.; NEGRINI, V.S.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. *Powder Technology* 101, 165-172, 1999. PII: S0032-5910_98.00168-5

SILVA NETO, O.G. Estudo da porosidade de tortas em filtros de manga operando na filtração de gases. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2002.

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.

SIMON, X.; BÉMER, D.; CHAZELET, S.; THOMAS, D. Downstream particle puffs emitted during pulse-jet cleaning of a baghouse wood dust collector: Influence of operating conditions and filter surface treatment. *Powder Technology* 261, 61-70, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.028>

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

SUTHERLAND, K. Filters and filtration handbook. 5^a ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.

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. *Sep. Purif. Technol.* 80, 187–195, 2011. [doi:10.1016/j.seppur.2011.04.031](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.031)

TANABE, E. H. Desempenho dos meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos. São Carlos/SP, 2011.

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

THOMAS, D., PENICOT, P., CONTAL, P., LECLERC, D. AND VENDEL, J. Clogging of Fibrous Filters by Solid Aerosol Particles. Experimental and Modeling Study. *Chem. Eng. Sci.* 56: 3549–3561, 2001.

TIEN, C. Granular filtration of aerosols and hydrosols. Butterworths, USA, 2007.

TIENI, E. F. Filtração de gases: estudo do fenômeno da limpeza por blocos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2005.

TOGNETTI, E. R. Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2007.

WAKEMAN, R. The influence of particle properties on filtration. *Separation and Purification Technology* 58, 234-241, 2007. doi:10.1016/j.seppur.2007.03.018

WALSH, D. C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behavior under solid particle load. *Filtration and Separation*. V. 33, 1996.

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

ZHANG, Y., ZHANG, W., YANG, W., LIU, J., YANG, F., LI, N., DU, L. Enhancement of fine particle filtration with efficient humidification, *Chin. J. Chem. Eng.*, 2015. doi:10.1016/j.cjche.2015.11.023

ZHOU, Y., NING, X-A., LIAO, X., LIN, M., LIU, J., WANG, J. Characterization and environmental risk assessment of heavy metals found in fly ashes from waste filter bags obtained from a Chinese steel plant. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 95, 130–136, 2013. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.05.026