



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA
VELOCIDADE E DOS CICLOS DE
FILTRAÇÃO NA FORMAÇÃO DA TORTA
NA LIMPEZA DE GASES EM FILTRO DE
MANGAS

Sandra Mara Santana Rocha

Uberlândia - MG
2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E DOS CICLOS DE FILTRAÇÃO NA FORMAÇÃO DA TORTA NA LIMPEZA DE GASES EM FILTRO DE MANGAS

Sandra Mara Santana Rocha

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento em processos Químicos.

Uberlândia - MG
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG – Brasil

R672L Rocha, Sandra Mara Santana, 1977-
Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na
formação da torta na limpeza de gases em filtros de mangas / Sandra
Mara Santana Rocha. - 2010.
143 f. : il.

Orientadora: João Jorge Ribeiro Damasceno.

Co-orientadora: Mônica Lopes Aguiar.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Gases - Separação - Teses. 2. Filtro de tecidos - Teses. 3. Gases -
Filtração - Teses. 3. Engenharia química - Teses. I. Damasceno, João
Jorge Ribeiro. II. Aguiar, Mônica Lopes. II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.071

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, em 08/07/2010

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador (PPG-EQ/UFU)

Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar
Orientadora (DEQ/UFSCar)

Prof. Dr. José Renato Coury
(DEQ/UFSCar)

Prof. Dr^a. Meuris Gurgel Carlos da Silva
(FEQ/UNICAMP)

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(FEQ/UFU)

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
(FEQ/UFU)

Dedicatória

Dedico este Trabalho:

A Deus pela vida e pelas pessoas maravilhosas que Ele permitiu que cruzassem o meu caminho

Aos meus pais, Expedito e Wilma, pela confiança, apoio e incentivo; por serem amigos, perseverantes, companheiros, batalhadores e exemplos de honestidade e humildade, pelo amor incondicional a mim dedicado, por me permitirem um amanhã melhor a cada dia, melhor do que qualquer um deles alcançaram. Por serem o motivo maior do meu viver e por darem lições de vida, pois nos vários momentos difíceis que passamos, eles carregaram o fardo pesado com muita dignidade e persistência, mostrando que é preciso lutar e ultrapassar os obstáculos que a vida nos impõe .

A minha irmã que onde quer que esteja sei que festeja mais esta vitória, assim como quando pequeninas.

Ao meu namorado, esposo e companheiro Alex, pela constante compreensão, apoio e amor a mim dedicados todos os dias; pelos momentos difíceis que abdicou de minha companhia e com paciência soube esperar por um minuto de atenção. Com carinho, amor e gratidão dedico-lhe este trabalho. Consegui trilhar esse caminho e graças ao seu incentivo alcancei meu objetivo.

Agradecimentos

Aos meus pais, meu marido, meus sobrinhos, e toda minha família, que sempre torceram por mim, e se abdicaram de minha companhia e atenção durante grande parte dos anos dedicados a este trabalho.

Ao Professor João Jorge Ribeiro Damasceno, pela orientação, pela amizade de longa data, por ter me trazido de volta ao meio acadêmico, quando deste eu já havia me despedido, pela sua importância em minha trajetória acadêmica, a qual se fez presente em vários momentos, pelos ensinamentos tanto profissionais quanto pessoais, meu muito obrigada por tudo que compartilhaste comigo.

A professora Mônica Lopes Aguiar pela valiosa orientação, confiança e dedicação durante toda a realização deste trabalho, bem como pela amizade cultivada, pelos conselhos, pelas horas de conversa quer em sua sala, ou no laboratório cheio de pó, pelo incentivo nos momentos cruciais em que eu achava que não seria capaz de retornar.

Ao professor Jose Renato Cory, pela colaboração com este trabalho, pelos esclarecimentos a minhas dúvidas, pela disciplina ministrada, que foi de grande importância no desenvolvimento do meu trabalho.

Ao professor Luiz Gustavo Martins Vieira pela orientação na parte de simulação, em que eu se quer sabia o que fazer, hoje graças a sua paciência meus trabalhos nesta área alcançaram reconhecimento internacional. Pela contribuição na discussão dos resultados deste trabalho, e principalmente, obrigada pela sua amizade e atenção, você é um daqueles amigos que sempre está presente, independentemente de hora ou lugar.

Ao professor Claudio Roberto Duarte, para mim eternamente Mezenga, que desde a minha Graduação, tem contribuindo com a minha vida acadêmica, pela ajuda nas discussões de resultados, pela amizade e respeito.

A professora Vicelma, minha tutora em grande parte de minha vida acadêmica, muitos frutos aqui apresentados também são de sua responsabilidade, mudei de área mais ainda tenho em você uma grande mestre.

Aos meus amigos Demian, Cezar, Tanabe, Vanessa, Lucas, Tiago, Edson, Dasci, André, Letícia e todos os outros que não citei aqui mas que fizeram meus dias em São Carlos serem mais fáceis.

Ao meu Amigo Tanabe deixo um grande agradecimento, por sua paciência no início do meu aprendizado em filtração, pelas discussões no decorrer do meu trabalho, pelas cervejas tomadas junto, e por me ouvir sempre que precisei

A minha amiga Taisa, principalmente pela sua amizade, mais também pela grande colaboração no Latex, por estar sempre de prontidão para meus pedidos de socorro.

Ao Silvino e Anisio, pela ajuda não só profissional, sei que tenho em vocês dois grandes amigos.

A todos os professores e funcionários da FEQUI/UFU pelo grande apoio e formação.

*A CAPES pela concessão de bolsa de estudo e pela interação com o DEQ UFSCar.
A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.*

Sumário

Sumário	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xii
Resumo	xv
Abstract	xvii
1 INTRODUÇÃO e OBJETIVO	1
1.1 INTRODUÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	3
1.2.1 Objetivo Geral	3
1.2.2 Objetivos Específicos	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 FILTRO DE MANGAS (FILTROS DE TECIDO)	5
2.2 TECIDOS FILTRANTES	8
2.2.1 Tecidos Trançados	11
2.2.2 Tecidos não Trançados ou Feltros	12
2.3 FORMAÇÃO DA TORTA	17
2.4 REMOÇÃO DA TORTA DE FILTRAÇÃO	21
2.5 CICLOS DE FILTRAÇÃO	25
2.6 VARIÁVEIS IMPORTANTES PARA A OPERAÇÃO DE FILTRAÇÃO	28
2.6.1 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO	28
2.6.2 QUEDA DE PRESSÃO NO SISTEMA	29
2.6.3 Arraste do Filtro	32
2.6.4 Resistência Específica da Torta	33
2.6.5 Permeabilidade do Meio Filtrante	34
2.6.6 Porosidade do Meio Filtrante	37
2.6.7 Porosidade da Torta de Filtração	38
2.7 PROPRIEDADE DAS PARTÍCULAS	45
2.8 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)	50
2.8.1 Geração da Malha	52
2.8.2 Solução Numérica	53

2.8.3	Aplicações de CFD em Operações de Filtração	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	57
3.1	Materiais	57
3.1.1	Material Particulado	57
3.2	Meio Filtrante	59
3.3	Unidade Experimental	60
3.3.1	Alimentador de Partículas	61
3.3.2	Caixa de Filtração	62
3.3.3	Sistema de Aquisição de Dados	64
3.4	Planejamento Experimental	65
3.4.1	Análise Estatística das Respostas	67
3.5	Metodologia Experimental	70
3.5.1	Filtração	70
3.5.2	Limpeza	71
3.5.3	Obtenção da Porosidade	72
3.6	Determinação da Permeabilidade dos Meios Filtrantes	76
3.7	Fluidodinâmica Computacional	76
3.7.1	Confecção da Malha Computacional e Simulação	77
3.7.2	Simulação	77
3.7.3	Levantamento das Curvas de Velocidade	79
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
4.1	Planejamento de Experimentos	81
4.1.1	Testes na Região Ótima	86
4.2	Influência da Velocidade de Filtração na Regeneração do Meio Filtrante	88
4.3	Influência do Número de Ciclos na Regeneração do Meio Filtrante	99
4.4	Estudo da Fluidodinâmica do Gás na Caixa de Filtração	105
4.4.1	A Influência da Velocidade de Filtração na Fluidodinâmica do Gás	105
4.4.2	A Influência do Número de Ciclos na Fluidodinâmica do Gás	114
4.5	A Influência da estrutura do Meio Filtrante na Fluidodinâmica do Gás	118
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	131
5.1	CONCLUSÕES	131
5.2	SUGESTÕES PARA Trabalhos Futuros	133
	Referências Bibliográficas	135

Lista de Figuras

2.1	Filtro Manga Industrial	6
2.2	Ilustração de Filtração de Profundidade	17
2.3	Ilustração de Filtração de Superfície	19
2.4	Fotografias com a Formação de Dendritos no Tecido Obtido por (a) SONG et al. (2006) e (b) THOMAS et al. (2001)	19
2.5	Determinação do Ponto de Colmatação do Meio	20
2.6	Curva Característica de Filtração para o Tecido Virgem	21
2.7	(a) Superfície do meio filtrante com a torta de filtração e (b) Fenômeno Patchy Cleaning e (c) Imagem do fenômeno patchy cleaning geradas no microscópio ótico (ampliação 200 vezes) FonteTANABE (2008)	23
2.8	Ciclos Ideais de Filtração	25
2.9	Ciclos de Filtração Reais	26
2.10	Comparação entre Ciclos de Filtração Reais com Limpeza por Blocos e Ciclos Ideais	27
2.11	Determinação do Arraste Efetivo nos Estágios Iniciais da Filtração	33
2.12	Desenho Esquemático do Comportamento das Camadas de Pó Durante o acréscimo da Carga Mássica (antes de atingir a espessura crítica de compressibilidade)	39
2.13	Diâmetros Equivalentes Utilizados na Determinação do Tamanho de uma Partícula	47
2.14	Fluxograma para Resolução de um Problema Utilizando CFD	52
3.1	Foto em microscopia eletrônica da rocha fosfática	58
3.2	Distribuição Granulométrica do Material Particulado	58
3.3	Micrografia da Superfície de Poliéster Tratado, Gerada no MEV do IQSC USP (a) com aumento de 50 vezes; (b) com aumento de 500 vezes	60
3.4	Esquema Geral do Equipamento de Filtração e Limpeza	61
3.5	Sistema de Alimentação de Sólidos	62
3.6	Caixa de Filtração	63
3.7	(a) Equipamento no Modo de Filtração; (b) Equipamento no Modo de Limpeza	64
3.8	Translação da superfície de resposta da origem para o ponto estacionário.	70
3.9	Equipamento para o pré-endurecimento da amostra	73
3.10	Vista do equipamento de embutimento	74
3.11	Tecido endurecido após embutimento	74
3.12	Amostras polidas e recobertas com tinta a ouro	75
3.13	Detalhamento da Malha construída no Ambiente GAMBIT® (a) sistema de filtração (b) meio filtrante	78
3.14	Posição das curvas do perfil de velocidade	80
4.1	Superfície de resposta para espessura (E) para $X_1 = 1,287$	84

4.2	Superfície de resposta para massa removida (Mr) para $X_1 = 1,287$	85
4.3	Superfície de resposta para massa coletada (M_c) para $X_1 = 1,287$	85
4.4	Superfície de resposta para porosidade (ϵ) para $X_1 = 1,287$	86
4.5	Queda de pressão total para três as velocidades em função do tempo de filtração	89
4.6	Perda de carga em função da carga mássica do ciclo 1 (a) ao ciclo 10 (j).	90
4.7	(a) Massa total de sólidos filtrada,(b) Massa de sólidos desprendida na limpeza e (c) Massa de sólidos retida no meio após a limpeza	91
4.8	Partículas remanescente da limpeza do ciclo 10 para velocidades (a) 5 cm/s , (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s	94
4.9	Queda de pressão residual para as velocidades de filtração utilizada	95
4.10	Micrografia do corte longitudinal de tortas de filtração com aumento de 2000 vezes (a) amostra sem tratamento (b) amostra binarizada (velocidade de 5 cm/s e 10 ciclos de filtração)	96
4.11	Micrografia do corte longitudinal de tortas de filtração com aumento de 2000 vezes (a) amostra sem tratamento (b) amostra binarizada (velocidade de 10 cm/s e 10 ciclos de filtração)	97
4.12	Micrografia do corte longitudinal de tortas de filtração com aumento de 2000 vezes (a) amostra sem tratamento (b) amostra binarizada (velocidade de 15 cm/s	98
4.13	Queda de pressão em função do tempo de filtração	100
4.14	Tempo de filtração em função do número de ciclos	101
4.15	Massa removida na limpeza em função do número de ciclos para as velocidades de 5 e 15 cm/s	102
4.16	Massa retida no meio filtrante após a limpeza em função do número de ciclos para as velocidades estudadas	103
4.17	Queda de pressão residual em função do número de ciclos para as velocidades de 5 e 15 cm/s	104
4.18	Porosidade de Filtração em função do número de ciclos	104
4.19	Perfil de pressão ao longo do eixo longitudinal da caixa de filtração	106
4.20	Perfil de velocidade à montante do meio filtrante nas velocidades de (a) 5 cm/s ; (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s	107
4.21	Recirculação do fluido na região entre o eixo e a carcaça do equipamento para a velocidade superficial de 15 cm/s	108
4.22	Perfil de velocidade à montante do meio filtrante nas velocidades de (a) 5 cm/s ; (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s	109
4.23	Perfil de velocidade no interior do meio filtrante para as velocidades superficiais de (a) 5 cm/s ; (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s	111
4.24	Perfil de velocidade na superfície de entrada do meio filtrante (a) e saída do meio filtrante (b)	112
4.25	Perfil de velocidade a jusante do meio filtrante para a velocidade de 10 cm/s	113
4.26	Perfil de velocidade em diferentes ciclos de filtração para a velocidade superficial de 10 cm/s	115
4.27	Perfil de velocidade em diferentes ciclos de filtração para a velocidade superficial de 10 cm/s	116
4.28	Curvas de velocidade a montante do meio filtrante, a: $Z = 0,305m$; b: $Z = 0,475m$; c: $Z = 0,485m$; d: $Z = 0,495m$;	117
4.29	Curvas de velocidade a jusante do meio filtrante	118

4.30	Micrografia de um tecido de algodão trançado mostrando a forma das fibras, obtida em MEV do IQ/SC - USP, (a) com aumento de 50 vezes, (b) com aumento de 500 vezes.	119
4.31	Micrografia de um tecido de polipropileno trançado mostrando a forma das fibras, obtida em MEV do IQ/SC - USP, (a) aumento de 50 vezes e (b) aumento de 500 vezes.	120
4.32	Micrografia obtida em MEV do IQ/SC - USP, com aumento de 1000 vezes, (a) polipropileno e (b) algodão.	122
4.33	Perfis de velocidade para (a) algodão limpo, (b) algodão impregnado, (c) polipropileno limpo e (d) polipropileno impregnado.	123
4.34	Perfil de velocidade na posição (1) a 2 cm à montante do meio filtrante	125
4.35	Perfil de velocidade na posição (2) a 1 cm à montante do meio filtrante	125
4.36	Perfis de velocidade para o algodão e o polipropileno virgem	126
4.37	Perfis de velocidade para o algodão e o polipropileno impregnados com material particulado, na posição (4)	127
4.38	Perfis de velocidade para o tecido de algodão na posição 4.	128
4.39	Perfis de velocidade para o feltro de polipropileno na posição 4.	128
4.40	Perfil de velocidade para o polipropileno e o algodão impregnados na posição 3	129

Lista de Tabelas

2.1	Propriedade das Fibras Fonte:(DONOVAN, 1985)	10
2.2	Métodos de Limpeza Mais Frequentemente Utilizados em Filtros Manga [Fonte(THEODORE; BUONICORE, 1988)]	22
2.3	Propriedades primárias e secundárias das partícula Fonte: AZEVEDO (2009)	46
3.1	Resultado da caracterização do meio filtrante	59
3.2	Dimensões geométricas da caixa de filtração	63
3.3	Matriz do Planejamento Experimental	67
3.4	Condições Iniciais para Simulação no Fluent®	78
4.1	Matriz do PCC com as respostas empregada no estudo	82
4.2	Condições ótimas para as variáveis em estudo	83
4.3	Resultados referentes à validação da condição ótima	87
4.4	Valores da porosidade de tortas de filtração de gases obtidos pelo método direto e indireto para o décimo ciclo de filtração	99
4.5	Dados de Porosidade e Permeabilidade Usados na Simulação para os Tecidos após Limpeza	114
4.6	Características dos tecidos estudados	121
4.7	Comparação entre os valores de perda de carga experimental e simulados	123

LISTA DE SÍMBOLOS

A - área superficial de torta, M^2

B - coeficiente de permeabilidade do meio filtrante,

c' - fator de correção de Cunningham

d_e - diâmetro de uma esfera equivalente,

d_g - diâmetro médio geométrico, L

d_p - diâmetro da partícula, L

d_s - diâmetro de Stokes, L

K - fator de forma dinâmico, L

k - resistência específica total do filtro

k_m - resistência específica do meio filtrante

L - espessura do meio filtrante, L

L_c - espessura da torta, L

M - massa de torta, M

M_f - massa total filtrada, M

M_L - massa removida durante a limpeza, M

M_r - massa retida após a limpeza, M

NC - número de ciclos, adimensional

Q - vazão mássica de sólido

S - arraste efetivo do filtro

S_E - arraste efetivo em um ponto qualquer

t - tempo de filtração T

V_f - a velocidade superficial de escoamento do gás, LS^{-1}

X_1 - velocidade Filtração, LT_{-1}

X_2 - tempo de Filtração, T

X_3 - número de ciclos de Filtração, adimensional

W - carga mássica, ML_{-2}

W_R - carga mássica residual

P - pressão, $ML^{-1}T^{-2}$

Símbolos Gregos

α - coeficiente de resistência viscosa, adimensional

ε - porosidade, adimensional

ΔP - queda de pressão, $ML^{-1}t^{-1}$

ΔP_t - queda de pressão total, $ML^{-1}t^{-1}$

ΔP_c - queda de pressão devido a formação da torta de filtração, $ML^{-1}t^{-1}$

ΔP_m - queda de pressão no meio filtrante, $ML^{-1}t^{-1}$

ΔP_r - queda de pressão residual, $ML^{-1}t^{-1}$

λ - livre caminho médio das moléculas do gás

μ_g - viscosidade do gás, $ML^{-1}T^{-1}$

ρ - densidade do ar, ML^{-3}

ρ_p - densidade de partícula, ML^{-3}

ϕ - esfericidade, adimensional

σ_g - desvio padrão do diâmetro médio geométrico das partículas;

Nomenclatura

CCDM - caracterização e Desenvolvimento de Materiais

CFD - Fluidodinâmica Computacional

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura

MO - Microscópio Óptico

PCC - Planejamento Composto Central

RESUMO

A permeabilidade e a porosidade são parâmetros de grande importância para o projeto de filtro de mangas. Esses parâmetros interferem tanto na queda de pressão do sistema, durante a operação de filtração, quanto na força necessária para a remoção da torta. A regeneração do tecido após cada filtração altera consideravelmente as propriedades do meio filtrante. Portanto, estudar o comportamento da formação e da remoção da torta durante os ciclos de filtração é importante para a obtenção de tecidos mais eficientes, resistentes e baratos. Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo investigar a influência dos ciclos de filtração na estrutura da torta formada a partir de diferentes velocidades superficiais de filtração. Para tal, foram realizados experimentos de filtração com as velocidades superficial de 5, 10 e 15 cm/s , para 10 ciclos de filtração, e velocidades superficial de 5 e 15 cm/s , para queda de pressão máxima de 2300 e de 9000 Pa, respectivamente, para 100 ciclos de filtração. Também foi investigada a influência da velocidade de filtração e do número de ciclos na fluidodinâmica do gás através da técnica de CFD. Para obter tais informações, foram realizados testes no equipamento de filtração pertencente ao Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, que consistia em um filtro circular com área livre de filtração de 249 cm^2 , com vazão mássica e umidade relativa do ar controladas e um sistema de aquisição de dados. Os meios filtrantes utilizados foram os feltros de poliéster (gramatura 534 g/cm^2), de polipropileno (gramatura 600 g/cm^2) e de algodão (gramatura 735 g/cm^2). O material pulverulento usado foi o concentrado fosfático ($\rho_p = 2,79$ g/cm^3). Foram obtidas micrografias de tecido em MEV (microscópio eletrônico de varredura), que foram analisadas em um programa de análise de imagem, por meio do qual foram obtidos os valores de porosidade média. Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a colmatação do meio filtrante foi dependente da velocidade de filtração, sendo o tempo de sua formação menor para as maiores velocidades. Essas velocidades também foram responsáveis pelo acúmulo de maior número de partículas em regiões mais profundas do meio filtrante. A velocidade de 15 cm/s apresentou maior massa coletada na filtração, porém essa não liberou maior quantidade de massa durante a operação de limpeza. Também foi essa velocidade que apresentou a maior perda de carga, visto que as partículas remanescentes da limpeza obstruíram os poros do tecido e tenderam a aumentar a resistência do meio ao fluxo de ar. A porosidade medida diretamente apresentou valores em torno de 15% menores que os valores estimados pela correlação de Ergun. Em relação ao número de ciclos, a partir do ciclo 70 para a velocidade de 5 e 15 cm/s , a massa removida foi praticamente igual, ou seja, a velocidade de filtração não mais influenciou na massa removida. A perda de carga apresentou uma variação em função do número de ciclos. O estudo fluidodinâmico do gás foi feito por meio de simulações com o uso da técnica de CFD (fluidodinâmica computacional), em que se constatou que a velocidade de filtração tem maior influência na fluidodinâmica do gás que o número de ciclos. Em referência às simulações em tecido de algodão e feltro de polipropileno, este último se mostrou mais favorável para a filtração de gases, quando comparado

com o tecido de algodão, tanto experimentalmente como nas simulações via CFD.

Palavras-chave: *Filtração de gases; Velocidade de filtração; Ciclos de filtração; Porosidade; CFD.*

ABSTRACT

The permeability and porosity are parameters of great importance for the design of the fabric filter. These parameters affect the pressure drop in the system during operation of filtration as well the strength needed to remove the dust cake. The regeneration of cloth after each filtration significantly alters the properties of filter media. Therefore, the study of the characteristics of formation and removal of the dust cake during the filtration cycles are important to obtain fabric filters more efficient, durable and inexpensive. In this context, this study aimed to investigate the influence of filtration cycles on the structure of dust cake formed from different velocities of filtration. To this end, experiments were performed with filtration velocity of 5, 10 and 15 $cm.s^{-1}$, and 100 cycles of filtration with mean surface velocity of 5 and 15 $cm.s^{-1}$, with pressure drop maximum of 2300 and 9000 Pa, respectively. The study of the influence of filtration velocity and number of cycles in the fluid dynamics of gas were performed using a technique of CFD (Computational Fluid Dynamics). To obtain such information, tests were performed on filtration equipment belonging to the Laboratory of Environmental Control, Department of Chemical Engineering at Federal University of São Carlos, which consisted of a circular filter with filter-free area of 249 cm^2 with a mass flow rate and humidity on the air in a controlled system acquisition system data. The filter media used was a polyester felt (weight 534 $g.cm^{-2}$), a polypropylene (weight 600 $g.cm^{-2}$) and cotton (weight 735 $g.cm^{-2}$). The powder material used was the phosphate concentrate ($\rho_p = 2.79 g.cm^{-3}$). Micrographs of cloth were obtained by SEM (Scanning Electron Microscope), which they were analyzed in a specific image program and with this micrographs were possible to obtain the values of average porosity. Based on these results, it could be concluded that the clogging of the filter medium was dependent on the rate of filtration, being the time of its formation less for higher velocity. These velocities were also responsible for the accumulation of greater numbers of particles in deeper regions of the filter medium. The results with velocity of 15 $cm.s^{-1}$ show a high mass collected on filter, but this has not released much mass during the cleaning operation. This velocity also showed the greatest loss, since the particles remaining from cleaning clogged pores of the fabric and tended to increase the resistance of the flux of air. The porosity values measured directly were around 15% lower than the values estimated by correlation of Ergun. In relation of the number of cycles, from cycle 70 to the velocity of 5 and 15 $cm.s^{-1}$, the mass removed was almost equal, ie the rate of filtration no longer influenced the mass removed. On the other hand, the pressure drop had a variation in the number of cycles. The fluid dynamic study of the gas was done through simulations using the technique of CFD, which found that the filtration rate has great influence on the fluid dynamics of gas that, the number of cycles. With reference to the simulations in cotton fabric and felt of polypropylene, the latter was more favorable for the filtration of gases, compared to cotton, both experimentally and via simulations in CFD.

Keywords: *Filtration of gases; velocity filtering; Cycles filtering; Porosity; CFD.*

Capítulo 1

INTRODUÇÃO e OBJETIVO

1.1 INTRODUÇÃO

A globalização e o aquecimento global, assim como a escassez de determinadas matérias-primas têm pressionado, cada dia mais, as empresas a buscarem alternativas para controlar a emissão de particulados, quer seja por exigências governamentais, com política de respeito ao meio ambiente, ou por reaproveitamento da matéria-prima com alto valor agregado. Assim, o mercado de sistemas de controle ambiental têm crescido cerca de 20% ao ano, concomitante, surgem novos fabricantes de filtros, assim como profissionais mais qualificados sobre o tema. O aumento de empresas especializadas em equipamentos de controle de missões atmosféricas resultou no crescimento da concorrência nesse setor. A busca pela sobrevivência nesse mercado globalizado pressiona as empresas a inovarem e a apresentarem equipamentos cada vez mais eficientes, baratos e de simples operação.

Para controlar a qualidade do ar, minimizando a quantidade de poluentes atmosféricos lançados pelo setor industrial, está em vigência a Resolução nº 382 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 26 de dezembro de 2006, que estabelece a fixação dos limites por poluentes e por tipologia da fonte e, ainda, exige a consideração da capacidade suporte da atmosfera. Para se adequarem à legislação vigente, as indústrias devem utilizar sistemas para promover a limpeza de gases, antes de seu descarte na atmosfera.

Um dos sistemas mais comumente utilizados são os filtros de mangas, uma vez que apresentam alta eficiência de coleta para partículas inaláveis. O princípio dessa operação é a separação

mecânica das partículas pelo escoamento do aerossol através do tecido e do meio poroso formado pelas partículas depositadas sobre ele, denominada de torta de filtração.

A filtração é uma importante operação unitária comumente utilizada na separação sólido-fluido, pela passagem do fluido por meio de um meio poroso permeável (DICKENSON, 1994). A filtração se dá inicialmente pela captura de partículas no interior do meio filtrante, denominada de filtração interna, onde ocorre a colmatção do filtro. Com a posterior deposição das partículas sobre a superfície do meio filtrante, ocorre a formação de uma camada de material particulada denominada torta de filtração, que se torna o principal meio filtrante nas operações de filtração. Essa operação é contínua e a espessura da torta de filtração aumenta com o tempo, conseqüentemente, ocorre um aumento da eficiência de coleta e da resistência ao fluxo de ar, que gera altos valores de queda de pressão. Esse valor de queda de pressão é o determinante do momento de remoção da torta de filtração, haja vista que, para manter a queda de pressão dentro de um valor aceitável, deve-se remover, periodicamente, a camada de sólidos.

A limpeza do filtro é necessária de forma a se restabelecer as condições operacionais da filtração. Assim, pode-se dizer que a operação de filtração é cíclica e cada ciclo é composto pela operação de filtração, seguida da remoção da torta de filtração. Portanto, a limpeza é uma etapa importante a ser considerada em qualquer filtro de mangas, porque está relacionada à queda de pressão residual e à vida útil do meio filtrante.

A estrutura do meio filtrante após a regeneração do tecido é alterada, modificando a permeabilidade do meio filtrante e a porosidade da torta de filtração. Esses são parâmetros de grande importância para o projeto de filtro de mangas, porque tanto a queda de pressão no filtro, durante a operação de filtração, quanto a força necessária para a remoção da torta, na operação de limpeza, são dependentes desses parâmetros. Portanto, estudar as características de formação e de remoção da torta durante ciclos de filtração é importante para obter filtros de tecido mais eficientes, resistentes e baratos.

A Fluidodinâmica Computacional (CFD), baseada em bons modelos de previsão de fluxo de escoamentos, é capaz de simular o comportamento fluidodinâmico de um sistema de filtração, bem como os fenômenos neles envolvidos (turbulência e queda de pressão no meio filtrante). Dessa forma, o uso de modelos matemáticos que descrevam corretamente o mecanismo de deposição das

partículas no meio filtrante é extremamente importante, porque pode ajudar a prever, a otimizar, ou até mesmo encontrar novas técnicas que descrevam o fenômeno de filtração. O uso industrial das técnicas de CFD é relativamente recente, início da década de 90. A intensificação na utilização dessa ferramenta se deu graças ao desenvolvimento de computadores cada vez mais robustos em termo de processamento e armazenamento de dados, bem como a evolução das técnicas de solução numérica, permitindo assim, a simulação dinâmica de fenômenos complexos em computadores. Apesar de “recente”, a fluidodinâmica computacional tem-se mostrado eficaz na elaboração de projetos de novos equipamentos, no melhoramento de plantas já existentes e na otimização do funcionamento de equipamentos tradicionais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar a influência dos ciclos de filtração na estrutura da torta formada a partir de diferentes velocidades superficiais de filtração.

1.2.2 Objetivos Específicos

- selecionar a melhores condições operacionais por meio de um Planejamento Composto Central (PCC), avaliando a influência da velocidade de filtração, do tempo de filtração e do número de ciclos de filtração na estrutura da torta de filtração formada;
- avaliar a quantidade de ciclos necessários para a colmatação do tecido em cada velocidade estudada;
- estudar a torta formada, assim como a queda de pressão e a regeneração do tecido após 100 ciclos de filtração;
- subsidiariamente, avaliar a fluidodinâmica do gás para as diferentes permeabilidades dos meios filtrantes através das técnicas de CFD.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FILTRO DE MANGAS (FILTROS DE TECIDO)

A utilização de filtros de tecido para limpeza do ar é datada de 5000 anos atrás, desde o Egito Antigo. Nessa época, usavam-se sacos trançados sobre a cabeça e amarrados ao redor do pescoço, para proteger contra a exposição ao pó de dióxido de chumbo. Leonardo Da Vinci defendia o uso de panos molhados (*Wetting cloth*) sobre a boca e o nariz, visando à melhoria na respiração (filtração). O progresso na operação de filtração ocorreu lentamente. A primeira patente relativa a um filtro de mangas consta de 1852, quando S.T. Jones patenteou, nos Estados Unidos, um simples projeto de uma manga para a recuperação de fumaças de óxido de zinco. A partir de 1980, metalúrgicas passaram a utilizar filtros com milhares de mangas nas indústrias de fundição de zinco e chumbo. Com o desenvolvimento das fibras sintéticas em meados do século passado, ocorreu a fabricação de tecidos de alta qualidade e, assim, os filtros de tecido entraram na era moderna (MYCOCK et al., 1995).

O filtro de mangas tornou-se comum no meio industrial por ser o mais seguro método de controle de emissão de poluentes secos. Considerado como um separador de “altíssima eficiência de coleta” (99% para partículas maiores que um micron), e de fácil operação. O filtro de mangas utiliza tecidos especiais (trançados ou agulhados) como meios filtrantes e é capaz de recolher altas cargas de materiais particulados resultantes de processos industriais dos mais diversos segmentos, tais como: cimento, gesso, cerâmica, borracha, química, petroquímica, siderúrgica, automobilís-

ta, cal, mineração, amianto, alumínio, ferro, coque, silicatos, amidos, carvão, anilinas, fibras de grãos e muitos outros.

Um filtro de mangas industrial consiste, basicamente, em uma caixa que contém várias mangas de tecido (Figura 2.1), que tem por finalidade separar o material presente no fluxo de gases industriais.

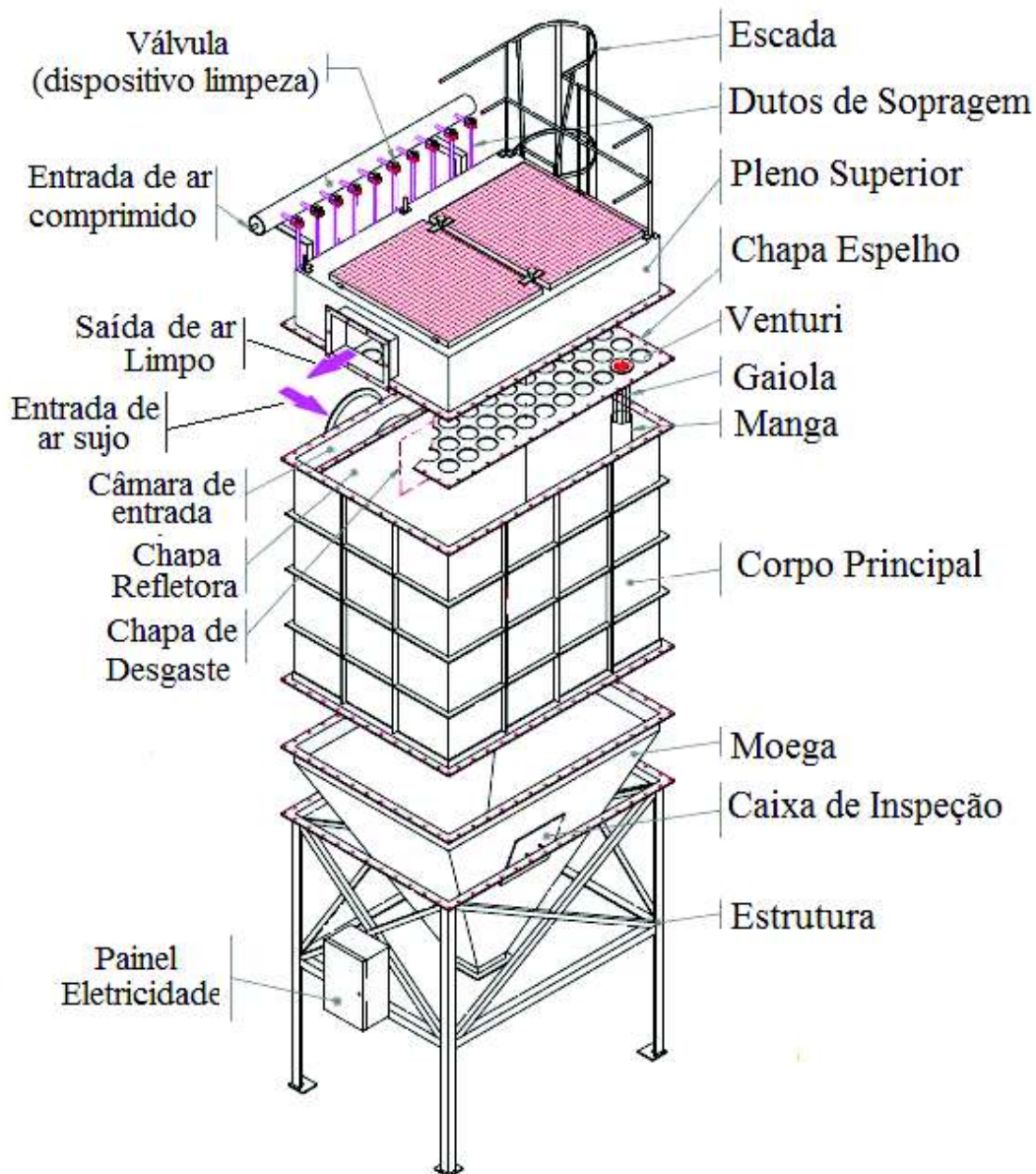


Figura 2.1: Filtro Manga Industrial

O material particulado pode ser um produto, como o negro de fumo, ou um subproduto, como a cinza produzida pela queima de carvão. Quando o particulado é um subproduto, esse pode ser recirculado e retornar ao processo, como é o caso, principalmente, do carvão não queimado. A filtração no filtro de mangas é realizada pela passagem do ar carregado de partículas através dessas mangas. As partículas ficam retidas na superfície das mangas e nos poros das fibras, formando a torta de filtração que passa ser a responsável pela filtração. Ao se atingir o tempo preestabelecido de filtração, ou a queda de pressão máxima admitida, a torta deverá ser removida das mangas (SANTOS, 2004; TIENI, 2005).

O desempenho satisfatório de um filtro de mangas em uma aplicação específica depende tanto da seleção adequada do material que será utilizado na confecção das mangas de filtração (elemento filtrante), da compatibilidade do material pulverulento a ser removido, do projeto apropriado com geometria apropriada do coletor de sólidos e do mecanismo de limpeza empregado. Deve-se ressaltar que tanto as características das fibras como dos fios influenciam na operação de filtração (BILLINGS; WILDER, 1970; MARTINS, 2001; RODRIGUES, 2004).

Portanto, um dos grandes problemas desse tipo de filtro está na determinação da excelente razão ar-pano, que deve ser compatível com o tipo de tecido escolhido para a construção das mangas e com o mecanismo de limpeza. A razão ar-pano influencia tanto na eficiência de coleta como na vida útil e no custo das mangas. Não existe uma expressão matemática que defina a eficiência de um filtro de mangas, que geralmente é alta. Quando eles são bem projetados fica em torno de 99,9% para material particulado com tamanho superior a $1\mu\text{m}$. Assim, o sucesso do projeto e da operação de filtro de mangas depende de uma interação entre quatro variáveis: a queda de pressão, a velocidade de filtração, o meio filtrante e a técnica de limpeza empregada (SEVILLE et al., 1997).

A seleção dos tecidos a serem utilizados como meios filtrantes depende da compatibilidade deles com o material particulado a ser coletado e das características e aplicações específicas da operação de filtração: temperatura, abrasão, energia de absorção, propriedades da filtração, resistência aos álcalis, ácidos e oxigênio, o custo relativo do material e do tipo de limpeza a ser empregado nas mangas, (BARNETT, 2000; RODRIGUES, 2004; TIENI, 2005).

Dessa forma, as propriedades físicas e estruturais dos tecidos de filtração têm influência mar-

cante na operação de limpeza de gases em filtro de mangas, visto que é neles que acontece a coleta do material particulado e a remoção desse material durante a operação de limpeza do filtro (RODRIGUES, 2004). Existem diversas fibras que são utilizadas na confecção dos tecidos empregados em filtros.

Até o início do século passado, as fibras naturais, de origem animal, vegetal ou mineral, constituíram a única fonte disponível de fibras têxteis. Filtros de alta qualidade foram desenvolvidos a partir dessas fibras. Embora esses tecidos possuam algumas limitações provenientes de suas propriedades físicas, eles ainda são muito utilizados.(DONOVAN, 1985; RODRIGUES, 2004).

A vida útil operacional de um filtro de mangas pode ser encurtada por três fatores relacionados com as condições do fluxo de gás: a durabilidade do tecido, a abrasão e o ataque químico. A principal delas é o limite superior de temperatura a que o tecido resiste ou a durabilidade térmica (TIENI, 2005).

Segundo MCKENNA e FURLONG (1992), o fornecedor do material deve ser consultado, de forma a garantir a faixa de tolerância do tecido durante a operação. O gás também pode ser resfriado antes de ser filtrado, porém deve-se cuidar para que não haja muita umidade nem a condensação dos gases nas mangas, inutilizando-a por empastamento. Outro problema frequentemente encontrado na operação de filtro de mangas é a abrasão, que pode ser resultante da fricção das mangas umas contra as outras e da solicitação de forças feitas durante a limpeza.

2.2 TECIDOS FILTRANTES

A produção de tecidos começa com uma unidade estrutural básica, que consiste de uma simples fibra. As fibras das quais os filtros de tecidos são confeccionados têm origem na natureza ou em processos industrializados (DONOVAN, 1985).

As fibras naturais foram as primeiras a serem utilizadas na confecção das mangas dos filtros de manga, porém, a vazão de ar nesses filtros era limitada a, no máximo, 8 ft³/min. Em velocidades mais altas, o material pulverulento era mais compactado, o que levava a uma grande queda de pressão e à quebra local da torta de filtração, permitindo uma penetração excessiva do sólido no filtro. Mais recentemente, com o desenvolvimento dos tecidos sintéticos, maiores velocidades

podem ser empregadas, sem que haja penetração demasiada de material pulverulento. Os filtros de tecido sintético, por sua flexibilidade, apresentam maior durabilidade e facilidade de limpeza do que os de fibra natural (ITO, 2002).

Devido às limitações de temperatura das fibras de algodão e de lã, essas não têm sido aplicadas na filtração de fontes de combustão. Foi somente nos últimos 50 anos que, com o desenvolvimento das fibras têxteis sintéticas, houve o aumento no uso dos filtros de tecido, porque eles passaram a ter alta qualidade e capacidade de resistir a altas temperaturas, que são as requeridas das fontes de combustão de gases. As novas fibras sintéticas têm oferecido maior aplicação na filtração em filtros de tecido (DONOVAN, 1985). Isso se deve ao baixo custo, à maior resistência química e mecânica e ao menor diâmetro das fibras (MARTINS, 2001). Como exemplos de fibras sintéticas, tem-se o nylon, o poliéster, o acrílico, o polipropileno, o teflon, entre outras. As principais propriedades de algumas fibras estão ilustradas na Tabela 2.1.

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

Fibras: são as componentes básicas do fio. O fio pode ser confeccionado com materiais sintéticos ou naturais e ser constituído por fibras curtas (segmentadas), que são denominadas fibras cortadas ou “staple”, ou por filamentos, uma fibra contínua CHEREMESINOFF e YOUNG (apud RODRIGUES, 2006).

Fios: a fiação transforma as fibras em fios por um processo em que elas são “torcidas” em fios, sendo essa torcida medida pelo número de voltas por polegada. Quanto mais torcido o fio, mais forte ele será, até certo ponto limitante (DONOVAN, 1985). De acordo com CHEREMESINOFF e YOUNG (apud RODRIGUES, 2006), para fios formados por filamentos, é considerado ótimo o número de seis voltas por polegada e para fibras cortadas, de dez a vinte voltas. Ultrapassados esses valores, o fio perde elasticidade e torna-se quebradiço.

Padronização: Apesar da existência de vários parâmetros de caracterização dos tecidos, a indústria têxtil padronizou sistemas mais convenientes, como o Tex e o Denier. O número Tex é definido pela massa em gramas de um quilômetro de fio e, multiplicando-se esse valor por nove, obtém-se o número em Denier CHEREMESINOFF e YOUNG (apud RODRIGUES, 2006).

Tabela 2.1: Propriedade das Fibras Fonte:(DONOVAN, 1985)

Fibra	Resistência ácida	Resistência alcalina	Resistência a Temperatura Max (°C)	Resistência à abrasão
Algodão	Destruída por ácidos concentrados ou diluídos	Resistente	100	Moderada à boa
Nylon	Reage com ácidos minerais de todas as concentrações	Boa resistência até mesmo para álcalis concentrados a altas temperaturas	100	Excelente
Poliéster	Boa resistência para 30% HCl 50% H ₂ SO ₄ à 50 ^o	Resistência moderada com risco de hidrólise	150	Excelente
Acrílico (Dupont)	Boa resistência para 30% HCl 50% H ₂ SO ₄ à 50 ^o	Resistência moderada até mesmo a latas temperaturas	130	Moderada à boa
Acrílico (Bayer)	Resistência para HCl concentrado e 50% H ₂ SO ₄	Boa resistência	140	Moderada à boa
Polipropileno	Não afetado para ácidos concentrados exceto agentes oxidantes	Não afetados por álcalis concentrados, exceto agentes oxidantes	100	Boa
Teflon	Resistente à ácidos diluídos até mesmo à altas temperaturas	Resistentes	230	Razoável
Vidro	Resistente à todos exceto HF e H ₃ PO ₄ quente	Atacado por álcalis fortes	285	Fraca

Os fios formados por fibras sintéticas, para fabricação de tecidos trançados, podem ser apresentados em três configurações:

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

2.2.1 Tecidos Trançados

A maior parte dos tecidos utilizados na filtração de gases é confeccionada completa ou parcialmente por trançamento das fibras. O filtro de mangas no qual o gás flui de dentro das mangas para fora usa tecidos trançados quase que exclusivamente MYCOCK et al. (1995). Os filtros de tecido trançado oferecem baixa resistência ao fluxo de gás e seu acabamento macio confere boa característica de liberação (TOGNETTI, 2007). Conforme a ABNT/TB-392, um tecido trançado é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama formando um ângulo de (ou próximo de) 90° . O conjunto de fios que correm longitudinalmente em um pano é chamado de urdume, a estrutura básica do tecido trançado que deverá suportar o tecimento. O fio que é entrelaçado com o urdume, perpendicular a ele, é designado trama, formando-se assim o tecido trançado.

Os tecidos podem ser trançados de várias formas. O trançado **plano** é mais simples, com cada fio da trama passando acima e abaixo do urdume. O tecido trançado **sarja** é um segundo tipo de tecido, formado pelo entrelaçamento de mais de um e menos de quatro fios longitudinais em sequência do fio transversal. Ao fim de cada linha sucessiva, o padrão é mudado em um passo

para a direita ou à esquerda. Esse tipo de trançado fornece um tecido mais resistente e mais flexível que o trançado plano. O terceiro tipo de trançado é o de **cetim**, em que mais de quatro fios longitudinais são entrelaçados por vez. Esse tipo de trançado promove um acabamento acetinado ao tecido, mas não confere boa resistência como os outros trançados. Tais tecidos podem aparecer em duas variedades: a primeira, com uma face de fios longitudinais e a outra a de fios transversais, dependendo de qual fio aparece na superfície. Os tecidos trançados são, geralmente, utilizados em sistemas de filtração em que o fluxo de gás é direcionado do interior dos sacos para fora, que operam com baixas vazões de ar e que utilizam limpeza por fluxo de ar reverso ou por vibração mecânica (DAVIS; BUONICORE, 1992).

2.2.2 Tecidos não Trançados ou Feltros

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

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

muito mais poros por unidade de área que os tecidos trançados (HARDMAN, 2001).

DONOVAN (1985) afirmou que, em tecidos não trançados, a formação da torta ocorre mais lentamente que nos trançados, porque o espaço disponível para passagem do fluxo em um tecido trançado é mais concentrado que em um não trançado, e o bloqueio dessa passagem ocorre mais rapidamente por causa do fluxo concentrado. A fabricação dos feltros poliméricos pode ser classificada em três categorias básicas, conforme o processo de manufatura da rede inicial (véu) que constitui o tecido, essas categorias são listadas a seguir.

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

A técnica da agulhagem é um método mecânico de ligação da rede formada, que consiste em combinar duas ou mais camadas de fibras em um feltro produzido pelas técnicas apresentadas nas seções 1 e 2. Esse processo visa a distribuir as fibras uniformemente pela matriz trançada (CLARK, 2001). Algumas modificações na estrutura básica produzida no processo de perfuração podem determinar o desempenho de filtração dos tecidos agulhados. Quando a densidade de perfuração é aumentada durante o processo, um dos resultados é o aumento na densidade do tecido, que promove um aumento na eficiência de filtração (BAKER, 2001).

THEODORE e BUONICORE (1988) afirmam que os feltros limpos são mais eficientes que tecidos trançados limpos, mas que esses últimos são capazes de alcançar eficiências comparáveis após uma camada de partículas ter-se acumulado em sua superfície. Na indústria, esse processo de formação da torta pode durar, dependendo da carga e da natureza das partículas, desde algumas horas até alguns dias. Por esse motivo, no caso dos tecidos trançados, deve-se cuidar para que a

limpeza não elimine completamente a camada superficial da torta, o que diminuiria a eficiência da filtração. Como afirmam os autores, esse problema é mais difícil de ocorrer nos feltros pela grande quantidade de partículas retidas no interior do tecido após a limpeza. Assim, os feltros necessitariam de técnicas de limpeza mais rigorosas, empregando frequentemente métodos de pulso de ar.

A forma pela qual o tecido é confeccionado é uma das características que determinam a deposição e a liberação das partículas (MARTINS, 2001). Embora a literatura não apresente detalhes sobre isso, sabe-se que uma superfície lisa libera as partículas com mais facilidade do que uma superfície felpuda, porque o sólido pode aglomerar em fibras soltas e que, durante a limpeza, pode soltar-se das fibras e voltar à corrente de gás, tornando a higienização pouco eficiente (TIENI, 2005).

Para melhorar a eficiência de limpeza dos filtros, são realizados alguns tratamentos no acabamento do tecido. CALLÉ et al. (2002) estudou o comportamento da remoção da torta de sólidos em filtros de poliéster com e sem superfície tratada. Esse autor concluiu que o destacamento da torta de sólidos foi melhor para o filtro com a superfície tratada, tornando a operação de limpeza mais ativa. Confirmou, assim, que o tecido com a superfície tratada apresenta melhor regeneração.

Normalmente, os tecidos recebem tratamentos de forma a melhorarem a estabilidade mecânica. Podem ser tratados com silicone para facilitar a liberação da torta. Tecidos naturais (lã e algodão) geralmente passam por uma pré-lavagem para evitar o encolhimento das mangas durante a operação. Tanto tecidos naturais como os sintéticos são submetidos a tratamentos mecânicos, térmicos, físicos e químicos, para melhorar o desempenho dos meios filtrantes utilizados no processo de filtração (DONOVAN, 1985).

Entre os motivos que estimulam a realização de tratamentos finalizadores estão:

- i assegurar a estabilidade adequada ao tecido (contra o encolhimento, por exemplo);
- ii modificar as características superficiais, alterando inclusive a capacidade de liberação da torta;
- iii regular a permeabilidade do tecido e conseqüentemente, a capacidade de coleta (HARDMAN, 2001); e
- iv minimizar a penetração das partículas e diminuição da colmatação do tecido (MAUSCHITZ et al., 2005).

Alguns acabamentos nos tecidos são necessários para fornecer melhor estabilidade durante a filtração. Esses acabamentos estão listados a seguir.

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

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

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

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

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

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

Ao pensar em um meio filtrante composto por fibras, imagina-se que as partículas sejam coletadas por possuírem diâmetro maior que o espaço entre as fibras e têm sua trajetória interrompida, ou seja, o filtro funcionaria como uma “peneira” microscópica formada pelas fibras, cuja distância entre elas definiria o menor tamanho de partícula por ela retida. Essa determinação intuitiva do filtro mostra-se incorreta, ao se examinarem meios filtrantes reais, pois apenas uma pequena parte do volume do meio filtrante é ocupada por fibras; até 90% desse volume consiste de espaços vazios

(NETO, 2002).

Estudos anteriores mostraram que a eficiência do filtro depende fortemente da velocidade do gás, derrubando qualquer hipótese de que o determinante da faixa de retenção seja o espaço entre as fibras. Para que ocorra a filtração, é necessário que haja contato físico entre a partícula e coletor, que, no caso dos filtros de tecidos, são as fibras. Além disso, é necessário que a partícula permaneça retida no coletor.

Durante o escoamento do gás contendo material particulado, ele é forçado atravessar o meio contendo “coletores” e essa coleta ocorre por meio de diferentes mecanismos COURY (apud NETO, 2002).

A importância desses mecanismos varia de acordo com o tamanho e a velocidade das partículas, com a superfície de coleta e com a presença de forças eletrostática, gravitacional ou atração (ou repulsão) STRAUSS (apud TIENI, 2005). Os principais mecanismos de coleta são: interceptação direta, impactação inercial, por difusão e por gravitação. As forças eletrostáticas, térmicas e gravitacionais modificam a eficiência de coleta do filtro em circunstâncias especiais. Sob circunstâncias normais, as forças térmicas são desprezíveis na filtração, porque, para ser efetiva, deve existir uma diferença de temperatura muito grande entre as partículas e os s térmicas são desprezíveis na filtração, porque, para ser efetiva deve existir uma diferença de temperatura muito grande entre as partículas e os “coletores”. Na prática, devido às pequenas dimensões da fibra coletora, elas têm uma baixa capacidade calorífica e rapidamente alcançam a temperatura da corrente de gás. Devido à curta duração de qualquer diferença de temperatura, forças térmicas geralmente não são consideradas STRAUSS (apud TIENI, 2005).

Na coleta de partículas de maior diâmetro, os mecanismos de interceptação, impactação e gravidade tendem a prevalecer, quando as partículas a serem coletadas apresentam diâmetros menores, incentivam a difusão browniana. Como a distribuição granulométrica das partículas presentes na corrente gasosa não é uniforme, a captura das partículas acontecerá por mais de um mecanismo. Assim, a eficiência total será menor que a soma da eficiência de cada mecanismo, porque a captura de uma partícula pode ser contabilizada em mais de um mecanismo (RODRIGUES, 2006).

O estudo dos mecanismos de coleta de partículas é de grande complexidade e, geralmente, utiliza cálculos simplificados, considerando a coleta de partículas em uma única fibra, perpendi-

cular ao sentido de escoamento do fluido (HINDS, 1999). Esses mecanismos são particularmente importantes para os primeiros estágios da filtração.

2.3 FORMAÇÃO DA TORTA

A filtração de gases desenvolve-se a partir de um tecido limpo (virgem), em sequência de algumas etapas (filtração de profundidade, transição e filtração superficial). O comportamento de cada etapa é influenciado por vários fatores relevantes para essa operação (RODRIGUES, 2006; POWELL, 1998). Na primeira etapa da filtração, denominada de “deep filtration”, filtração interna ou, ainda Filtração de profundidade, como mostra a Figura 2.2 em que as fibras do meio filtrante são responsáveis pela captura das partículas. Essas partículas ficam retidas nas fibras por ação de mecanismos de captura.



Figura 2.2: Ilustração de Filtração de Profundidade

Fonte: CERON (2009)

Nos instantes iniciais da filtração, as partículas penetram intensamente no interior do tecido, ficando retidas nos interstícios das fibras. A penetração das partículas através do tecido é maior e tende a diminuir com o tempo de filtração, o que implica menor eficiência de captura apresentada pelo tecido nesse período, mas aumento rápido com o decorrer do tempo de filtração. Nessa etapa, a queda de pressão tem um aumento latente e essa resposta é diretamente proporcional ao número de partículas coletadas. Ou seja, a queda de pressão apresenta um comportamento linear em função da massa coletada e depende dos mecanismos de captura (RODRIGUES, 2006;

THOMAS et al., 2001; AGUIAR, 1991). Dependendo do meio filtrante, no início da filtração, pode-se notar comportamento não linear da queda de pressão com o tempo, comportamento que tende a se linearizar após a formação da torta. Essa observação foi confirmada pelo trabalho de SCHMIDT (1995), que observou um período de transição inicial e que o tempo de duração da deposição das partículas no interior do tecido foi de apenas alguns segundos, seguido por outra fase em que a permeabilidade permaneceu constante, sem alteração da torta. Entretanto, com o decorrer do tempo de filtração, o autor notou um afastamento de linearidade, com aumento do coeficiente angular, e atribuiu a isso à compressibilidade da torta.

A duração dessa fase inicial de filtração, caracterizada pelo lento acréscimo da queda de pressão, pode ser maior ou menor, dependendo da característica (eficiência) do tecido, sendo maior no tecido virgem e diminuindo sensivelmente nos ciclos subsequentes. Alguns autores, RODRIGUES (2006), WALSH et al. (1996), JAPUNTICH et al. (1994) concluíram que a duração dessa fase depende das características do tecido. No caso dos filtros HEPA (*high efficiency particulate aerosol*), que são classificados pela NBR 7256 como filtro absoluto da classe A3 com eficiência maior ou igual a 99,97% para partículas de $0,3\mu\text{m}$, essa etapa é praticamente inexistente sendo a formação da torta quase instantânea.

Como a filtração é uma operação contínua, com o transcorrer da filtração, ocorre a formação de uma fina camada de sólidos na superfície do filtro, denominada de torta de filtração. Ela passa, então, a desempenhar o papel de um novo meio filtrante, ou seja, essa camada de pó se torna a responsável pela captura das partículas que se acumularão aumentando a espessura da torta de filtração com o tempo. Portanto, após a formação da torta, o tecido passa a desempenhar apenas o papel de suporte para a torta. Nessa fase, tem-se a denominada filtração superficial ou *cake filtration* (FIGURA 2.3) conforme menciona DULLIEN (apud RODRIGUES, 2006). Dependendo do meio filtrante, a primeira etapa, filtração de profundidade, poderá não acontecer, ocorrendo apenas à filtração superficial.

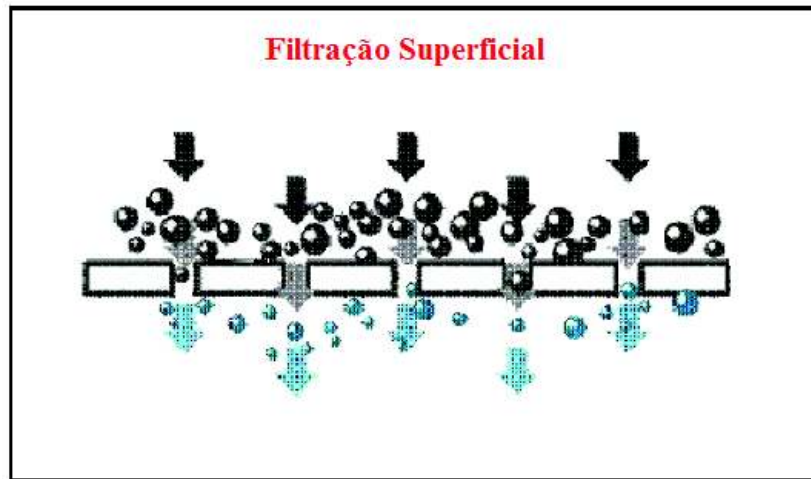


Figura 2.3: Ilustração de Filtração de Superfície

Fonte: CERON (2009)

PAYATAKES (1977) subdividiu essa fase intermediária em duas: a deposição de partículas ocorre inicialmente sobre as primeiras partículas coletadas (Figura 2.4 a), e segue-se a fase do crescimento dos detritos, em que as partículas interagem com seus vizinhos (Figura 2.4 b), formando uma cobertura de espessura não uniforme ao redor de cada fibra, denominada pelo autor de matriz porosa interna. Como resultado da formação dessas estruturas, a queda de pressão aumenta e a penetração das partículas através do meio filtrante sofre uma significativa diminuição (RODRIGUES, 2006; WALSH et al., 1996; BROWN; WAKE, 1999).

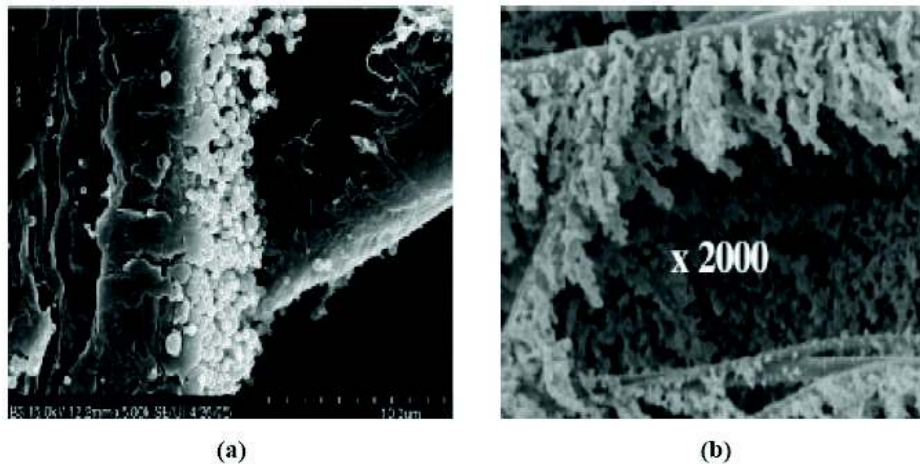


Figura 2.4: Fotografias com a Formação de Dendritos no Tecido Obtido por (a) SONG et al. (2006) e (b) THOMAS et al. (2001)

Hoje se sabe que quanto menor a velocidade de filtração, maior a porosidade dessas estruturas *destríticas* (KANAOKA; HIRAGI, 1990), e quanto menores as partículas, mais rápido se dá o desenvolvimento desse detritos (WALSH et al., 1996).

Não se pode prever fisicamente o momento exato da formação da torta de filtração, por causa da não uniformidade dos materiais dos tecidos. A dificuldade de se determinar experimentalmente esse ponto fez com que muitos estudiosos adotassem um valor experimental que demarcaria o ponto em que a torta se forma (ponto de colmatação). Segundo JAPUNTICH et al. (1994), esse ponto pode ser entendido como a capacidade de retenção do meio poroso. A velocidade de colmatação de um tecido depende do tamanho das partículas. Quanto menores forem as partículas envolvidas, maior será a velocidade de colmatação, visto que o espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas é pequeno (WALSH et al., 1996). Para esses autores, fisicamente, o ponto de colmatação é dado pelo lugar geométrico obtido no gráfico de queda de pressão em função da carga mássica, correspondente ao cruzamento da assíntota da curva, relativa à filtração superficial, com o eixo das abscissas, assim se obtém a massa de material particulado necessária para formar a torta. O esquema para a determinação do ponto de colmatação por esse método está ilustrado na Figura 2.5.

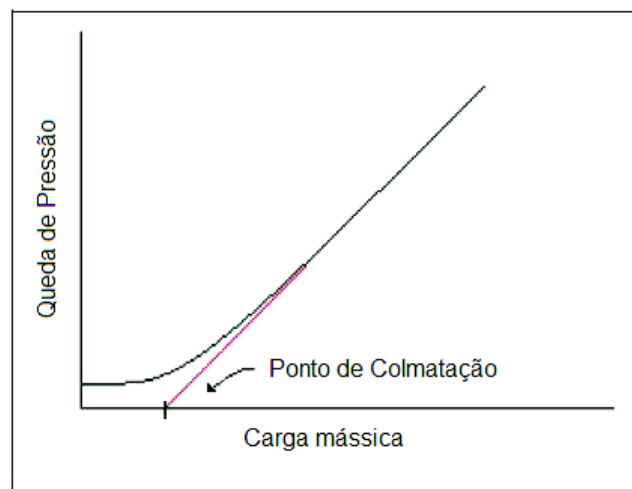


Figura 2.5: Determinação do Ponto de Colmatação do Meio

Fonte: TOGNETTI (2007)

A terceira etapa da filtração é aquela que ocorre a partir da existência da torta na superfície do tecido e é nessa fase que a queda de pressão alcança o seu valor máximo. Nessa etapa, a penetração das partículas quanto à eficiência de filtração se tornam constantes (RODRIGUES, 2006). Na terceira

etapa, conhecida como filtração superficial, o meio filtrante passa a atuar apenas como suporte para a torta, sendo essa capaz de remover partículas mais finas da corrente gasosa, alcançando maior eficiência de remoção. Dessa forma, torna-se mais interessante que o estabelecimento da filtração superficial ocorra o mais rápido possível ROTHWELL (apud RODRIGUES, 2006). As três fases descritas podem ser mais bem compreendidas na Figura 2.6.

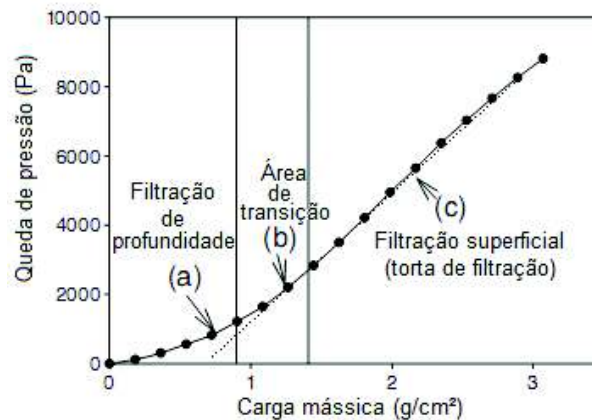


Figura 2.6: Curva Característica de Filtração para o Tecido Virgem

Fonte: SONG et al. (2006)

KANAOKA e HIRAGI (1990) verificaram um crescimento mais acelerado dos detritos que antecedem a formação da torta nos casos em que prevalece a captura de partículas pelo mecanismo de difusão, sendo esse crescimento mais moderado na faixa de coleta da interceptação direta e mais lento quando a coleta se deu no regime inercial. JAPUNTICH et al. (1997) ratificaram essas informações em seu trabalho, em que os autores concluíram que para filtros de papel, esse ponto é função do mecanismo de coleta que rege a operação e sugeriram que, para determinado mecanismo, esse ponto é proporcional ao diâmetro do poro.

2.4 REMOÇÃO DA TORTA DE FILTRAÇÃO

A operação de limpeza é de fundamental importância no desempenho da filtração e a maioria dos estudos a respeito dessa operação tem concentrado seus esforços em conhecer os mecanismos específicos para cada técnica de limpeza utilizada. Para se remover a torta de um tecido, a força aplicada à torta deve ser maior que aquelas que a ligam ao tecido, mas se conhece muito pouco a

respeito dessas forças (LEITH; ALLEN, 1986).

A Tabela 2.2 apresenta os mecanismos de limpeza mais frequentemente utilizados juntamente com algumas propriedades que influenciam a limpeza.

Tabela 2.2: Métodos de Limpeza Mais Frequentemente Utilizados em Filtros Manga [Fonte:(THEODORE; BUONICORE, 1988)]

Método de Limpeza	Uniformidade da Limpeza	Tipo de Tecido	Velocidade de filtração	Custo de Equipamento	Custo de Energia	Carga de Poeira
Fluxo Reverso, sem Flexibilidade	Boa	Trançado	Média	Médio	Médio-Baixo	Média
Fluxo Reverso com Colapso	Média	Trançado	Média	Médio	Médio-Baixo	Média
Pulso Reverso	Muito Boa	Trançado Feltro	Muito Alta	Alto	Alto	Alta
Vibração	Boa	Trançado	Média	Médio	Médio Baixo	Média
Sônica	Média	Trançado	Média	Médio	Médio	-
Manual	Boa	Trançado Feltro	Média	Baixo	-	Baixa

Para se estudar o descolamento da torta, pode-se considerar o balanço de forças em um elemento de volume de torta. A tensão total requerida para a remoção do elemento tem duas componentes: a primeira é a tensão normal à superfície da torta, requerida para remover o elemento na interface com o tecido (área de adesão); a segunda é a tensão de cisalhamento necessária para remover o elemento nas interfaces laterais (área de coesão) com o restante da torta. As forças que prendem os elementos ao tecido são denominadas de forças de adesão e mantêm unidas as partículas da torta aos componentes do tecido. Já as forças que prendem o elemento ao restante da torta são denominadas de forças de coesão, porque estão relacionadas à interação entre as partículas que formam a torta, sendo, portanto, dependentes da sua espessura (RODRIGUES, 2004).

Para uma torta ser removida do tecido, deve ser aplicada uma força capaz de quebrar as forças adesivas que unem a torta ao tecido ou a coesão interna da torta (MORRIS; ALLEN, 1996).

Teoricamente, assim que a força dessa união adesiva e ou coesiva é excedida por qualquer mecanismo de limpeza, a torta se destaca simultaneamente em toda parte. No entanto, nem a força

coesiva/adesiva da torta nem a tensão aplicada são inteiramente uniformes através da superfície do filtro, resultando dessa forma, no fenômeno conhecido como “patchy cleaning” ou limpeza por blocos (SEVILLE et al., 1997). Na Figura 2.7 estão ilustradas a formação da torta de filtração e o fenômeno de “Patchy Cleaning”.

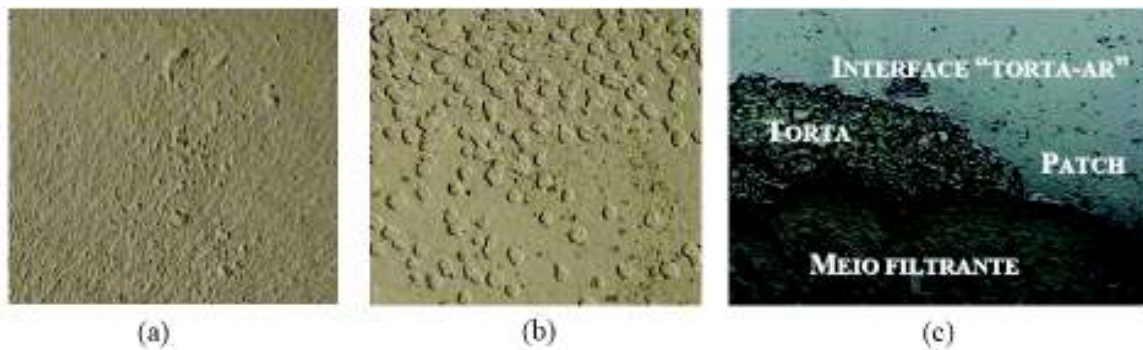


Figura 2.7: (a) Superfície do meio filtrante com a torta de filtração e (b) Fenômeno Patchy Cleaning e (c) Imagem do fenômeno patchy cleaning geradas no microscópio ótico (ampliação 200 vezes) Fonte TANABE (2008)

A adesão da torta, incluindo também os efeitos de coesão é um fator primário nas falhas de filtros de tecidos. Ela determina quanta energia deve ser colocada no sistema durante a etapa de limpeza (TIENI, 2005). Alguns autores atribuem esse comportamento ao fato de que a tensão aplicada para a remoção encontra-se em falhas ou desuniformidades da torta gerando rachaduras que se propagam (KOCH et al., 1996). Autores como DENNIS e KLEMM (1980) atribuíram as irregularidades da força de adesão na interface torta tecido, devido às áreas mais fracamente aderidas a ele. A limpeza por blocos resulta numa distribuição desigual da espessura da torta e em uma velocidade não uniforme no ciclo seguinte (KAVOURAS; KRAMMER, 2003), interferindo na formação da nova torta após a limpeza e na queda de pressão (DITTLER; KASPER, 1999).

Atualmente, tem-se difundido o estudo da limpeza em blocos e também já se estabeleceram alguns perfis a partir dos trabalhos realizados. CALLÉ et al. (2002) afirmaram que o tamanho das partes removidas aumentava com o aumento da coesão, e KOCH et al. (1996) relacionaram esse aumento das partes removidas com o aumento da carga mássica por unidade de área filtrante. O mesmo foi observado por TIENI (2005), que também verificou que o número de pedaços removidos também aumentava com o número de ciclos.

KOCH et al. (1996) verificaram que, após a limpeza, os pedaços remanescentes tinham suas

forças de adesão ao meio filtrante enfraquecidas, apesar de apresentarem um contato superficial. Embora essas partes não proporcionassem quase nenhuma contribuição para a queda de pressão no sentido da limpeza, elas aumentavam consideravelmente a queda de pressão residual no restabelecimento da filtração. Esse fato revelou que as partículas que permaneciam no interior do tecido não eram as únicas responsáveis pela queda de pressão residual, evidenciando a interferência da limpeza em blocos no restabelecimento da filtração.

DITTLER e KASPER (1999) desenvolveram modelos bidimensionais para prever as quedas de pressão como função da eficiência de regeneração e padrões de regeneração. Os autores concluíram que a torta de pó cresceu principalmente nas áreas regeneradas do meio filtrante no início do ciclo de filtração. Já nas áreas em que a torta não foi removida, a camada de pó depositada no tecido cresceu significativamente no final dos ciclos de filtração.

MAUSCHITZ et al. (2004) dividiram a queda de pressão residual em duas frações, sendo a primeira constituída por partículas depositadas nas camadas próximas à superfície do meio filtrante, responsáveis pela resistência de colmatação no interior do meio filtrante, e a segunda composta pelas partículas depositadas na camada externa do filtro (torta remanescente). Esses autores ainda afirmaram que, durante a limpeza, as partículas reorganizam-se no interior de meio filtrante. Tal reorganização tem início com o descolamento ou aglomeração de partículas, seguido da difusão ou descolamento dessas partes no interior do meio para regiões que terão menor influência no escoamento de gás no ciclo seguinte. A nova configuração interna causaria menor queda de pressão que a configuração original, antes da limpeza.

(TIENI, 2005) estudou o fenômeno de remoção por blocos utilizando o poliéster tratado como meio filtrante. Esse estudo foi realizado com rocha fosfática com diâmetro volumétrico médio de partícula de $4,3 \mu\text{m}$. Nos ensaios de filtração foi mantida constante a velocidade de filtração de 5 cm/s e pressões máximas pré estipuladas de 1960, 2939, 3919 Pa. O tempo de limpeza foi de 2 minutos e as velocidades estudadas nessa limpeza foram de 5, 10, 13 e 16 cm/s . Concluiu-se que a saturação ocorria mais cedo para tortas mais finas (segundo ciclo), ao passo que, para tortas mais espessas a saturação, ocorria a partir do quarto ciclo. Concluiu-se também que a eficiência da limpeza era maior para as tortas de maior queda de pressão e que a maior velocidade de limpeza não foi a mais eficiente. O tamanho dos pedaços removidos aumentou com o aumento da queda de pressão máxima.

2.5 CICLOS DE FILTRAÇÃO

A operação de filtração é cíclica, uma operação de filtração seguida da remoção da torta, concluindo um ciclo. Após esta regeneração inicia-se uma nova filtração. Segundo a ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES (2003)), existem três tipos de comportamento de ciclos de filtração: ciclos de filtração ideais, reais e reais com regeneração incompleta.

O comportamento ideal de ciclos de filtração considera uma compactação inalterável da torta de filtração, com fluxos e concentrações de pó constantes, bem como limpezas uniformes do meio filtrante. Isso leva a ciclos uniformes, cujo tempo de filtração é idêntico ao do filtro virgem. Nesse caso, o aumento da queda de pressão residual deve-se à incorporação irreversível de partículas no interior do meio filtrante ou à permanência de uma fina camada de pó, com espessura uniforme, após a regeneração do meio filtrante (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003). A Figura 2.8 ilustra o comportamento de funcionamento descrito como “ideal”, nesse caso a queda de pressão segue como função linear com o tempo durante um ciclo de filtração.

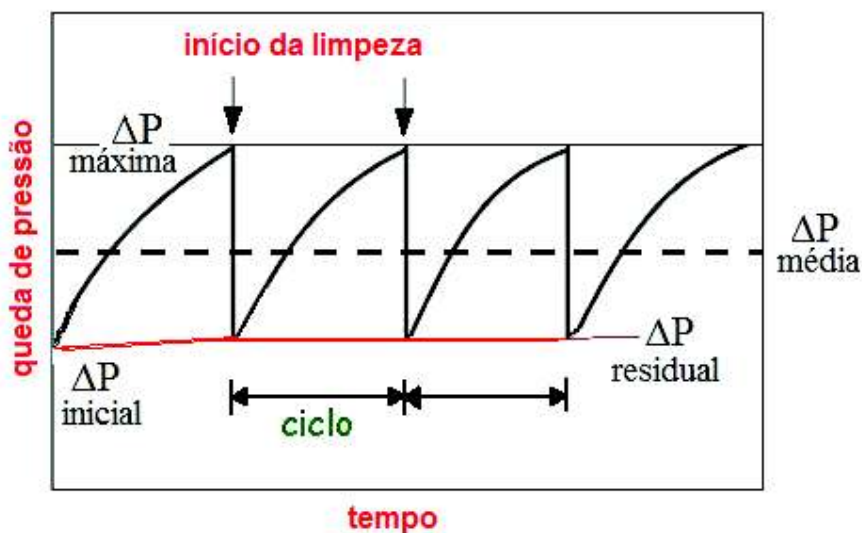


Figura 2.8: Ciclos Ideais de Filtração

Porém, quando ocorre a compressão do agrupamento de partículas no filtro, a porosidade da torta de filtração é reduzida, resultando em maior resistência ao fluxo e, conseqüentemente, aumentando a queda de pressão, especialmente para altas perdas de carga máximas (maiores que 2000 Pa). Essa compactação depende das propriedades do material particulado, às vezes é tão

comprimida que reduz agravadamente os tempos dos ciclos de filtração. Outro motivo para a redução dos tempos de ciclos de filtração é a queda de pressão residual causada pela impregnação do tecido com o sólido ou pela regeneração incompleta, deixando remanescentes pedaços de torta.

O comportamento real dos ciclos de filtração pode ser visualizado na Figura 2.9. É notória a redução do tempo de filtração quando comparados com o comportamento ideal, as curvas reais não apresentam comportamento linear nos primeiros ciclos. Essa não linearidade se dá pela compressão da torta de sólidos formada, resultando em um tempo de filtração bem menor quando comparado com o ideal (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003).

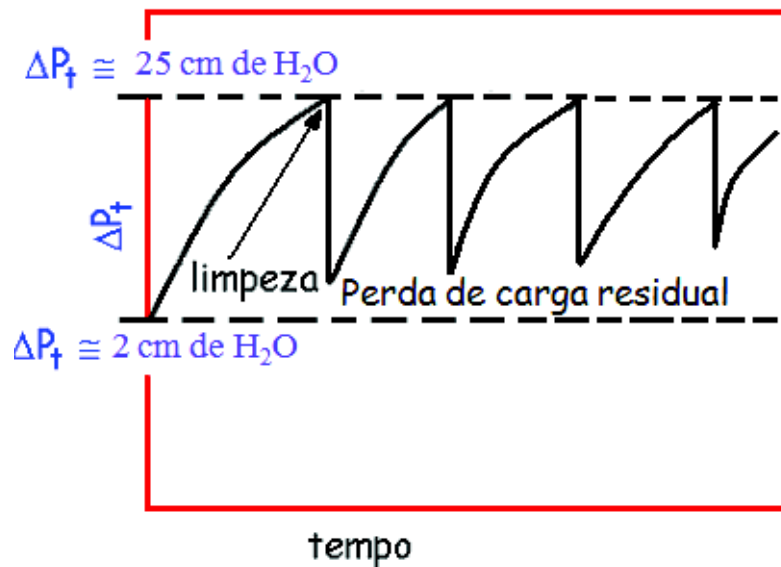


Figura 2.9: Ciclos de Filtração Reais

Quando a remoção da torta de filtração acontece em blocos, diz-se que a regeneração do meio filtrante foi incompleta, ou seja, sobraram pedaços de torta na superfície do meio filtrante. Se esse fenômeno ocorrer, quando a filtração for retomada, ocorre à formação de fendas na torta e também uma redução do tempo do ciclo de filtração. Nesse caso, a curva de queda de pressão em função do tempo de filtração se torna convexa. Esse fenômeno reduz a área efetiva de filtração. Em caso de fluxo de volume constante, a velocidade de filtração aumenta nas áreas regeneradas do meio filtrante. Por causa dessa velocidade de filtração localmente aumentada, a deposição da camada de sólido no filtro forma-se principalmente nas áreas regeneradas do meio filtrante, gerando comportamento convexo das curvas dos ciclos de filtração como pode ser observado na Figura 2.10.

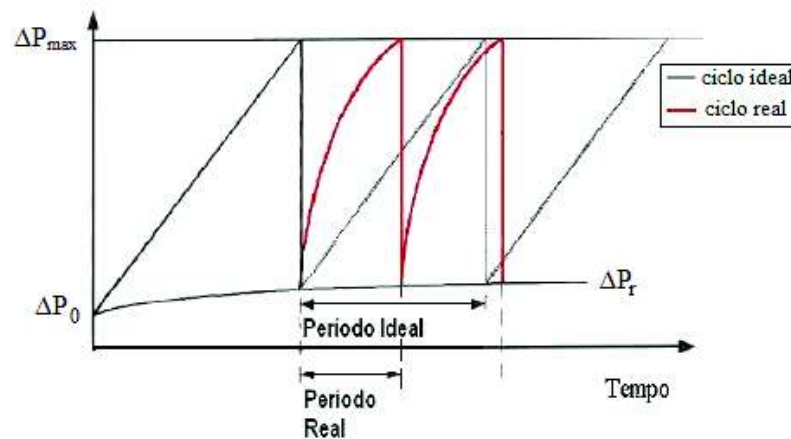


Figura 2.10: Comparação entre Ciclos de Filtração Reais com Limpeza por Blocos e Ciclos Ideais

Como descrito anteriormente, quando a torta atinge a melhor espessura para remoção, estabelecido pela queda de pressão máxima ou por um tempo de filtração fixado, é imprescindível pelo ponto de vista operacional e econômico, a remoção periódica da camada de partículas coletadas.

A literatura apresenta três métodos para a remoção do material coletado: a vibração mecânica das mangas, a reversão do ar (fluxo reverso ou por um pulso de ar a alta pressão) ou a combinação dos dois primeiros mecanismos de limpeza (RODRIGUES, 2004; RODRIGUES, 2006).

LORA (2002) considera a limpeza uma das questões mais importantes na operação de filtros de tecidos, pois uma limpeza inadequada provoca o acréscimo da queda de pressão residual. Entretanto, por outro lado, uma limpeza muito vigorosa pode danificar o filtro, reduzindo o período de vida útil do mesmo.

MARTINS (2001) estudou a deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido. Para realizar esse trabalho, foi utilizada rocha fosfática com densidade de partícula de $2,9 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ e diâmetro médio de partícula de $20,97 \mu\text{m}$, e feltro de poliéster como meio filtrante. A velocidade superficial de filtração foi de 5 cm/s e 10 cm/s , os ciclos de filtração foram de 3 a 10 com fluxo de ar reverso para a limpeza. Foi avaliada a profundidade de deposição de pó. A autora concluiu que a deposição de pó no tecido aumentava com o acréscimo no número de ciclos, para uma mesma velocidade de filtração, e que a profundidade da deposição das partículas não era homogênea para as diferentes regiões do tecido analisadas; para a maior velocidade de filtração, a profundidade de deposição foi maior. Observou-se, ainda, que a permeabilidade

e a resistência do fluxo de ar variavam com o número de ciclos; a permeabilidade apresentou um decréscimo e a resistência um acréscimo, com o aumento da massa residual de pó no tecido. A profundidade da deposição de pó no interior do tecido aumentou para maiores velocidades de filtração.

2.6 VARIÁVEIS IMPORTANTES PARA A OPERAÇÃO DE FILTRAÇÃO

2.6.1 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO

A velocidade do gás na interface do tecido é denominada de velocidade de filtração e é um parâmetro fundamental de projeto para filtros de tecido. A velocidade de filtração é que determina a área total efetiva do tecido, necessária para limpar um fluxo volumétrico de gás (SEVILLE et al., 1997). Em conjunção com o método de limpeza, a velocidade do gás determina as dimensões do filtro e, conseqüentemente, influencia significativamente no custo inicial (potência e manutenção do equipamento).

A velocidade de filtração utilizada em qualquer aplicação de filtração depende das características do pó, da distribuição do tamanho das partículas, da concentração de entrada do pó, da temperatura do gás, do método de limpeza do filtro e do tipo de tecido. Para a maioria das aplicações, a faixa utilizada é de $0,3 - 3,7 \text{ m/min}$ ($0,5 - 6,2 \text{ cm/s}$). Valores típicos para velocidade de filtração, para uma ampla faixa de tipos de materiais pulverulentos podem ser encontrados em SEVILLE et al. (1997).

SILVA et al. (1999), utilizando rocha fosfática de $20\mu\text{m}$ de diâmetro, estudaram a influência da velocidade de filtração na formação e remoção de tortas de filtração. Os autores observaram que a força de adesão aumentou com o acréscimo da velocidade de filtração, encontrando valores da mesma ordem de grandeza dos valores citados na literatura.

Altos valores na velocidade de filtração levam a um tempo de filtração pequeno, entretanto aumentam a penetração das partículas no tecido, o que dificultaria a remoção da torta, além de au-

mentar a queda de pressão durante a filtração e após a remoção da torta (queda de pressão residual). Consequentemente haveria uma redução na vida útil do tecido. Por outro lado, altas velocidades de filtração reduzem a área de filtração requerida, diminuindo o custo inicial, operacional e de manutenção dos filtros. No caso de baixos valores de velocidade de filtração, tem-se um maior consumo de energia, já que o tempo de retenção das partículas seria maior (DONOVAN, 1985). Entretanto, a interação entre a partícula e tecido é reduzida, facilitando a remoção da torta.

ITO (2002) estudou a influência da velocidade de filtração e do material particulado na estrutura da torta de filtração. Como material particulado foi utilizado rocha fosfática e polvilho doce. Nesse estudo, concluiu-se que a porosidade diminuía com o aumento da velocidade superficial de filtração e que o formato e a distribuição granulométrica das partículas influenciaram consideravelmente no valor da porosidade da torta. Foi desenvolvida uma nova técnica utilizando Microscópio Óptico (MO) para obter imagens da estrutura da camada de pó depositada na superfície do meio filtrante. Essa técnica mostrou-se mais econômica que a análise pelo MEV.

2.6.2 QUEDA DE PRESSÃO NO SISTEMA

A queda de pressão total de um filtro de mangas (ΔP) é dada pela diferença entre a pressão de entrada do fluido no filtro e a pressão de saída, após sua passagem pelo meio filtrante, que deve ser um meio poroso para permitir a passagem do gás. Segundo CAVASSEN (1980), a maioria dos filtros coletores de pó, na prática, é operada com quedas de pressão entre 490 e 1.961 Pa. Essa faixa de operação do ponto de vista econômico mostrou ser a melhor, porque, para operar com quedas de pressão mais altas, fazem-se necessários equipamentos mais potentes e caros com conseqüente aumento do consumo de energia. A queda de pressão de um filtro é tão importante quanto a eficiência e, às vezes, até mais importante, visto que elevados valores de eficiência são facilmente atingidos em filtro de mangas, em torno de 99,9% para partículas maiores que 1 μm . Os valores da queda de pressão em um filtro são mais difíceis de se controlar, pois esses valores aumentam proporcionalmente à quantidade de partículas coletadas durante os ciclos de filtração. Altos valores de queda de pressão inviabilizam completamente a operação de filtração MATTESON e ORR (apud RODRIGUES, 2006). O aumento da queda de pressão durante o ciclo de filtração é que determina a frequência de limpeza do filtro e, conseqüentemente, afeta a vida útil das mangas

(JEON; JUNG, 2004). Assim, o momento exato da limpeza do filtro é obtido por meio do controle da queda de pressão, ou seja, quando se atinge o máximo valor estipulado para a queda de pressão deve-se remover a torta de filtração. De acordo com SEVILLE et al. (1997), os valores das queda de pressão operacionais estão na faixa de 750 a 2.000 Pa.

Como a operação de filtração ocorre em ciclos, quando se inicia um novo ciclo de filtração, a queda de pressão através do filtro é bem menor que os valores imediatamente anteriores à limpeza, queda de pressão máxima admitida, mas ligeiramente superior ao valor inicial, correspondente ao filtro virgem. Esse acontecimento se dá tanto pela existência de pedaços de torta que não foram removidos (*Peatchy Cleaning*), como pelas partículas que permaneceram nos interstícios do tecido WILDER e BILLINGS (apud RODRIGUES, 2006).

A queda de pressão residual tende a aumentar após cada ciclo, pelo crescente acúmulo de partículas no interior do tecido (DULLIEN, 1989). Após vários ciclos, esse valor tende a se estabilizar, indicando uma “quantidade de equilíbrio de pó” ou uma saturação no tecido, que depende do tipo do material do filtro, do tamanho das partículas, do tempo e do tipo de sistema de remoção da torta (CALLÉ et al., 2002). Em alguns casos, esse equilíbrio pode nunca ser atingido, e a operação prossegue até que a vazão de ar não possa mais ser mantida por muito tempo sob condições adequadas de queda de pressão, tornando o processo impraticável e, conseqüentemente, sendo necessária a substituição das mangas (RODRIGUES, 2006).

A equação que define a queda de pressão total é dividida em duas partes: a queda de pressão do meio filtrante, ΔP_m , e a queda de pressão devido à formação da torta de filtração ΔP_c , como está descrito a seguir:

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

O escoamento através de meios porosos assemelha-se ao escoamento através de meios sólidos granulares TARDOS et al. (apud LUCAS, 2000). Assim, o comportamento da queda de pressão (ΔP) em função da velocidade de escoamento do gás (V_f) é similar à função correspondente nos sólidos granulares, ou seja a transição do escoamento laminar para o turbulento ocorre de maneira gradual.

Geralmente, a operação de filtração de gases ocorre a baixas velocidades e o comportamento

da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás pode ser expresso pela Lei de Darcy:

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \cdot \mu_g \cdot V_f \quad (2.2)$$

sendo, L a espessura do meio filtrante, α é o coeficiente de resistência viscosa, μ_g é a viscosidade do gás e V_f a velocidade superficial de escoamento do gás.

Para escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis em meios porosos, o termo, $1/(\alpha \cdot \mu_g)$, denominado coeficiente de permeabilidade do meio filtrante (B), pode ser considerado constante. Rearranjando a Equação 2.2 obtém-se:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V_f}{B} \quad (2.3)$$

em que L/B é a resistência específica total do filtro, denominada (k) e é diretamente proporcional a queda de pressão, se relacionando de forma linear entre essa e a velocidade de filtração, tem-se:

$$\Delta P = K \cdot V_f \quad (2.4)$$

Como a espessura do meio filtrante durante a operação é fixa, pode se determinar a queda de pressão no meio filtrante por meio da equação:

$$\Delta P_m = K_m \cdot V_f \quad (2.5)$$

sendo, K_m a resistência específica do meio filtrante.

Quando se estuda a queda de pressão através da torta, o aumento da espessura da torta (L_c) com o tempo deve ser considerado. Contudo, se a torta for incompressível, bem como se a densidade da partícula e a porosidade da torta de filtração forem conhecidas, é possível calcular a massa de sólido depositada por unidade de área (W), conforme COURY (1983), através da equação:

$$W = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L_c \quad (2.6)$$

Trabalhando a equação 2.6, tem-se:

$$L_c = \frac{W}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.7)$$

A Equação 2.7 define a espessura da torta em função da densidade de partícula e da massa de sólidos depositada por unidade de área.

Ao substituir a Equação 2.7 na Equação 2.3 e considerando L como L_c , determina-se a queda de pressão devido ao escoamento do gás através da torta pela equação:

$$\Delta P_c = K_c \cdot V_f \cdot W \quad (2.8)$$

em que K_c , dado por $K_c = 1/[\rho_p \cdot (1 - \epsilon) \cdot B]$, é a resistência específica da torta, para um dado sólido e porosidade constante (LEITH; ALLEN, 1986). Assim, substituindo as Equações 2.5 2.8 na Equação 2.1, encontra-se a equação da queda de pressão Total (ΔP_T):

$$\Delta P_T = K_m \cdot V_f + K_c \cdot V_f \cdot W \quad (2.9)$$

2.6.3 Arraste do Filtro

O arraste do filtro (S) é definido pela razão entre a queda de pressão total e a velocidade de filtração. Após a formação da torta de filtração, o arraste assume um comportamento linear em relação à quantidade de material particulado acumulado por unidade de área. O arraste do filtro pode ser escrito por meio da divisão dos membros da Equação 2.9 por V_f , tem-se:

$$\frac{\Delta P}{V_f} = S = K_m + K_c \cdot W \quad (2.10)$$

O arraste, em vez da queda de pressão total, é a medida da resistência aerodinâmica do filtro preferida por modeladores, porque o seu uso preserva o conceito da propriedade da camada do meio, independente da velocidade de escoamento (DONOVAN, 1985). Experimentalmente, verifica-se que, para os estágios iniciais da deposição de partículas, o arraste não é uma função linear, como apresenta a Equação 2.9. O arraste, em um ponto qualquer nas condições iniciais de filtração (S_E), pode ser calculado pela extrapolação da parte linear da curva até o ponto desejado, como demonstra a Figura 2.11.

O arraste efetivo pode ser calculado por:

$$S = \frac{\Delta P_T}{V_f} = S_E + K_c \cdot (W - W_R) \quad (2.11)$$

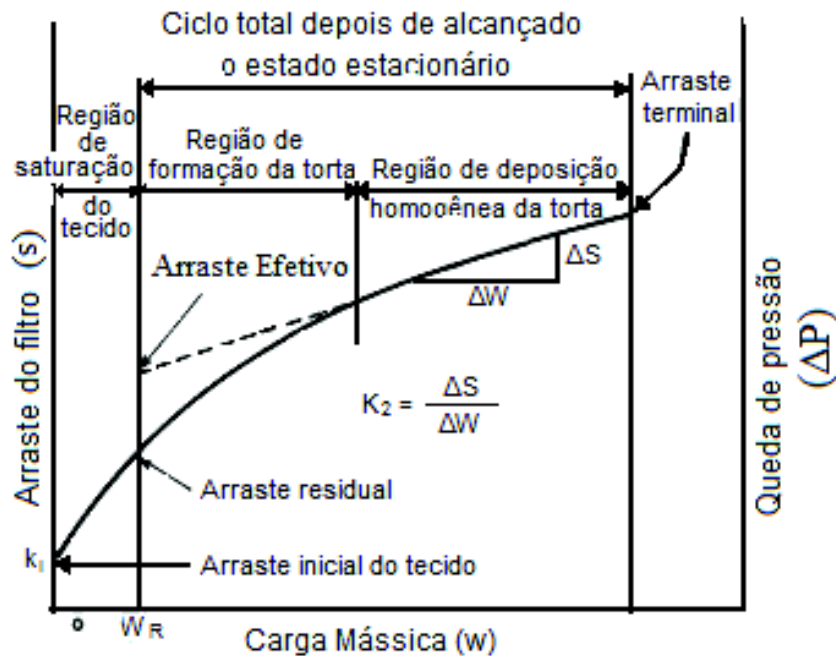


Figura 2.11: Determinação do Arraste Efetivo nos Estágios Iniciais da Filtração

Fonte: DONOVAN (1985)

em que W_R é a massa residual de pó por unidade de área, determinado experimentalmente.

Para os consecutivos ciclos de operação de um filtro obtém-se uma série de curvas semelhantes, sendo o arraste cada vez mais pronunciado, dependendo da eficiência do mecanismo de limpeza. A resistência efetiva da torta é dada pelo coeficiente angular da curva, de modo que a estrutura do tecido interfere muito pouco ou nada no valor do arraste. Conforme DENNIS e KLEMM (1982), a Equação 2.10 pode caracterizar adequadamente ou não tecidos trançados, sendo o ajuste dependente do tempo de utilização do tecido (uma vez que em tecidos usados a curva é praticamente toda linear) e da compressibilidade da torta.

2.6.4 Resistência Específica da Torta

A dependência da resistência específica da torta com a porosidade da torta, tamanho e densidade das partículas dificulta a determinação de k teórico, geralmente, esse parâmetro é determinado experimentalmente, sendo chamado de k_c , para distinguir do valor teórico. O cálculo de k_c é feito pelo aumento na queda de pressão ($\Delta P_2 - \Delta P_1$) no filtro com o ganho de massa ($M_2 - M_1$) para

o acúmulo de sólido:

$$k_c = \frac{A}{V_f} \cdot \frac{(\Delta P_2 - \Delta P_1)}{(M_2 - M_1)} = \left[\frac{\Delta S}{\Delta w} \right] \quad (2.12)$$

CHENG e TSAI (apud OSÓRIO, 2006) estudaram a influência do tipo de material particulado e da velocidade de filtração no valor da resistência específica e compactação de tortas de filtração (k_c) e concluíram que maiores velocidades de filtração resultaram em maior compactação e menor porosidade da torta, consequentemente maiores valores de resistência específica de tortas, k_c .

CHEN e HSIAU (2009a) estudaram as propriedades de compressão de tortas de pó fino por meio de medidas de espessura média das tortas, eficiência de coleta e queda de pressão sob condições experimentais. Com base nos resultados experimentais, foi observado que um aumento de 1 mmH_2O resultou numa diminuição de 0,001 na porosidade da torta e um aumento de 0,11% na eficiência de coleta. Segundo os autores, a porosidade da torta diminui e a resistência específica da torta aumenta com o aumento da força de compressão na torta. A torta de filtração foi compactada para maiores velocidades de filtração resultando em tortas menos porosas e maior resistência específica da torta. Eles concluíram que a força de compressão da torta correspondente pode melhorar a eficiência de coleta.

CHEN e HSIAU (2009b) desenvolveram um método experimental, com o intuito de melhorar o conhecimento sobre a formação e crescimento das tortas de filtração de gases. Eles desenvolveram um sistema de medida para medir a espessura das tortas. Segundo os autores, devido à influência da força de cisalhamento excessiva, a diminuição da espessura da torta causou uma redução na resistência específica da torta e da eficiência de coleta. No entanto, a velocidades superficiais de filtração maiores, a torta foi mais compactada resultando no aumento desses parâmetros, ou seja, a espessura e a velocidade superficial de filtração influenciaram significativamente o desempenho da filtração pela torta.

2.6.5 Permeabilidade do Meio Filtrante

A permeabilidade é uma medida macroscópica que determina a facilidade com que um fluido submetido a um gradiente de pressão percola os vazios em um meio poroso. Uma adequada descrição de permeabilidade deve, portanto, combinar aspectos do fluido, da estrutura porosa e do

escoamento. A equação de Forchheimer (1901) que como Darcy relaciona valores de queda de pressão com a velocidade superficial, é um exemplo de uma boa relação aceita na literatura:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu_g}{K_1} \cdot V_f + \frac{\rho_g}{k_2} \cdot V_f^2 \quad (2.13)$$

em que L é a espessura do meio filtrante, μ a viscosidade do fluido e ρ a densidade. O termo $\frac{\mu}{K_1} \cdot V_f$ representa os efeitos viscosos, enquanto $\frac{\rho}{k_2} \cdot V_f^2$ representa os efeitos cinéticos ou inerciais.

Para os casos de escoamentos puramente viscosos, a Equação 2.2 pode ser utilizada. Nessa equação, a constante $1/K_1$ é o coeficiente de permeabilidade do meio poroso. Com o aumento do Reynolds, a equação de Darcy deixa de ser satisfatória, já que os efeitos inerciais tornam-se importantes e devem ser considerados. Nesses casos, observa-se um comportamento parabólico da queda de pressão em relação à velocidade superficial, sugerindo-se o uso da Equação 2.13 para caracterizar o sistema.

A equação 2.13 é útil para quantificar a energia (pressão) necessária para forçar o gás percolar a membrana filtrante com a velocidade de filtração V_f desejada. Os maiores custos relacionados à operação de um filtro estão relacionados à área de filtração (que implica o número de unidades ou elementos de filtração), à queda de pressão (que implica a potência elétrica do ventilador) e à vida útil do elemento filtrante (que implica a frequência de aquisição e troca dos filtros).

Uma vez que a dependência entre a queda de pressão e a velocidade do fluido é parabólica, conforme a equação 2.13, então, para dobrar a velocidade do gás por meio do meio filtrante, é necessário que a queda de pressão seja aumentada entre duas e quatro vezes, com aumento proporcional na potência consumida pelo ventilador. Pela análise da equação 2.13, as alternativas para minimizar a queda de pressão e, assim, os custos devidos às restrições de área de filtração são a diminuição da espessura da membrana L ou o aumento das constantes de permeabilidade k_1 e k_2 .

A primeira opção é facilmente obtida durante o processamento cerâmico, promove redução linear de queda de pressão e não afeta a eficiência de coleta de partículas do aerossol, mas, por outro lado, pode comprometer a resistência mecânica da membrana às solicitações de filtração e assim reduzir a vida útil do filtro. Uma redução na queda de pressão também pode ser conseguida pelo aumento das constantes de permeabilidade k_1 e k_2 e a intensidade dessa redução irá depender

do peso de cada termo do lado direito da equação de Forchheimer. O termo linear $[\Delta V_s/k_1]$ representa a perda de energia por dissipação viscosa entre as camadas de fluido e prevalece para número de Reynolds no poro menor que 1.

A permeabilidade de um meio filtrante indica maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de seus poros ou vazios. Idealmente, o filtro deveria remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Isso pode ocorrer aumentando o volume de vazios na estrutura (porosidade) ou distâncias entre as fibras (poro). A permeabilidade do filtro é um parâmetro que deve ser considerado na escolha do meio filtrante. Filtros pouco permeáveis possuem baixa taxa de coleta de partículas, o que torna o processo economicamente menos vantajoso. Em alguns casos, filtros com baixo valor de permeabilidade são necessários como, por exemplo, quando a penetração de partículas pode causar danos para algum material ou ocasionar problemas no funcionamento de algum equipamento (INNOCENTINI et al., 2009).

Durante a operação de filtração, a permeabilidade do tecido é reduzida pela deposição de material particulado residual, causando valores de permeabilidade diferentes para o tecido novo e o tecido após a limpeza. Ao se confeccionar um meio filtrante para ser usado em filtro de mangas, o objetivo é mantê-lo altamente permeável, tanto limpo quanto impregnado de pó (DAVIS; BUONICORE, 1992).

TOGNETTI (2007) estudou a influência das condições operacionais na formação e remoção das tortas de filtração de gases. Esse estudo foi desenvolvido com rocha fosfática de diâmetro médio volumétrico de $4,5\mu\text{m}$ e como meio filtrante foi utilizado poliéster, acrílico e polipropileno. Constatou que o primeiro ciclo de filtração apresentava a maior massa coletada, e essa massa diminuía nos ciclos subsequentes até se tornar constante. Nesse trabalho, também, ele observou que a permeabilidade e a porosidade do meio filtrante interferiram nos valores de porosidade e da resistência específica da torta de filtração; os meios filtrantes mais porosos e permeáveis, com maior abertura superficial, geravam tortas de filtração com maior permeabilidade e menor resistência específica, possibilitando maior coleta de partículas.

2.6.6 Porosidade do Meio Filtrante

A porosidade do meio filtrante é um importante parâmetro estrutural e representa a fração de espaços vazios do meio filtrante (poros). A porosidade total (ϵ_t) é obtida pela equação:

$$\epsilon_t = 1 - \frac{\rho}{\rho_S} \quad (2.14)$$

sendo ρ_S a densidade do sólido, ρ a densidade total do meio (ρ = massa de sólidos/volume total da amostra). Quanto mais poroso o filtro, maior será a vazão conseguida e mais longa a vida útil do tecido (NETO, 2002)).

A porosidade do meio filtrante, geralmente, é dada pelo fabricante e também pode ser estimada por correlações existentes na literatura, que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido. Entre elas, pode-se destacar a equação de Ergun (1952):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot V_f}{d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot V_f^2}{d_p} \quad (2.15)$$

em que ρ_g é a densidade do gás, μ a viscosidade do gás, V_f a velocidade superficial do fluido, d_p o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes), L a espessura do meio.

A Equação 2.15 largamente aplicada para leitos granulares com porosidade entre 0,1 e 0,75; para partículas com diâmetro entre 10^2 e $10^4 \mu\text{m}$ e número de Reynolds de partículas maiores que a unidade.

A primeira parcela do segundo membro da Equação 2.15 refere-se aos termos viscosos e a segunda é relativa ao componente inercial. No caso de escoamentos puramente viscosos, como para gases na faixa estudada neste trabalho, pode-se considerar a parcela inercial desprezível em relação à viscosa e a Equação 2.15 fica reduzida à equação:

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot V_f}{d_p^2} \quad (2.16)$$

MAUSCHITZ et al. (2004), estudando a porosidade dos tecidos, verificaram que os filtros de feltro de poliéster mais porosos (85%) apresentaram maior retenção de partículas que o filtro de menor porosidade (51%). Ainda de acordo com esses autores, as partículas acomodaram-se mais na superfície do filtro menos poroso, devido ao maior número de pontos fundidos encontrados

por esse tecido. Além disso, esses pontos apresentaram menores forças de adesão, facilitando a remoção e minimizando a massa retida após a limpeza.

2.6.7 Porosidade da Torta de Filtração

A porosidade de tortas de filtração é um parâmetro estrutural muito importante para a filtração de gases. A queda de pressão no meio filtrante e a resistência ao escoamento do gás durante a operação de filtração, assim como as forças necessárias para remover a torta são influenciáveis por essa propriedade. A porosidade da torta de filtração está relacionada à compressibilidade da torta, que, por sua vez, determina a compactação, influenciando no valor da porosidade, e na queda de pressão por meio da torta (acrécimo) (KIM et al., 2008). A compressibilidade da torta durante a operação de filtração foi verificada por autores como AGUIAR e COURY (1996), CHOI et al. (2004b), ENDO et al. (1998).

SCHIMIDT e LÖFFLER (1991) simularam o aumento de uma camada de pó para três faixas granulométricas com tortas de diferentes espessuras. Observaram que a camada de pó mais próxima do tecido apresentava a menor porosidade média, no meio da torta essa porosidade tendeu a 85% e o valor da porosidade na interface torta-ar ficou próximo a 100%.

Para CHOI et al. (2004b), ao considerar um modelo de camadas finas, o acréscimo da carga mássica causa uma compressão das camadas mais próximas ao tecido (inferiores) pela força de arraste causada pela queda de pressão através das camadas superiores. Esse modelo considerou a divisão da torta em finas camadas ΔL_i , ou seja a espessura de uma torta depositada em um pequeno intervalo de tempo Δt_i . A primeira camada de espessura L_1 é formada inicialmente na superfície do meio filtrante. A segunda camada é formada sobre a primeira, essa nova camada aumentará a queda de pressão no sistema, desenvolvendo assim, uma força de arraste que será responsável pela compressão da primeira camada, que será “achatada”. Quando se forma a terceira camada, aumenta-se a queda de pressão e a primeira camada sofrerá uma força de compressão maior que a segunda. Na ótica das forças de compressão a porosidade e a espessura das camadas inferiores reduzem com o aumento da carga mássica. Entretanto essa taxa de aumento da espessura da torta torna-se constante a partir de determinada carga mássica coletada, esse fenômeno se dá pela tendência à incompressibilidade da camada de pó sob determinada espessura, ou seja, atinge o

limite de compressibilidade do material. Um desenho esquemático da compressão da torta para uma curva de espessura por carga mássica, ambas arbitrárias, pode ser vista na Figura 4.1.

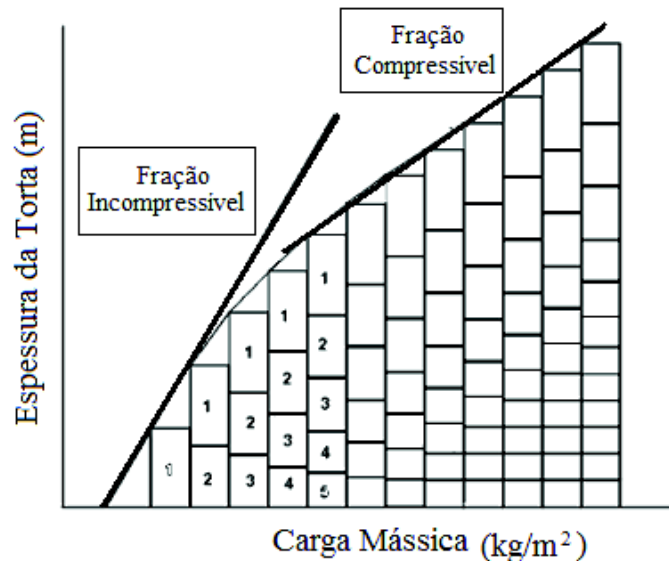


Figura 2.12: Desenho Esquemático do Comportamento das Camadas de Pó Durante o acréscimo da Carga Mássica (antes de atingir a espessura crítica de compressibilidade)

Fonte:CHOI et al. (2004b)

Mesmo sendo reconhecida cientificamente a importância do estudo da compressibilidade das tortas de filtração, a literatura apresenta poucos trabalhos relativos à investigação das propriedades de compressão. Essa deficiência na literatura é marcada pela dificuldade em mensurar experimentalmente a porosidade da torta de filtração, pois é muito difícil medir a porosidade da torta experimentalmente, ocasionada pela fragilidade da camada de sólidos (CHOI et al., 2004a).

Nesse contexto, existem duas formas de se obter a porosidade de tortas de filtração: a primeira é estimar essa porosidade a partir de correlações encontradas na literatura que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido, considerado como o método indireto; a segunda, determinar experimentalmente esse parâmetro a partir de fotografias da seção transversal de uma torta de filtração tratada para tal. Esses métodos são descritos a seguir.

Método Indireto

Equação de Ergun, do mesmo modo que a porosidade dos meios filtrantes, a porosidade da torta pode ser obtida utilizando-se a Equação 2.15 de Ergun considerando-se como L a espessura

da torta depositada. Por ser de difícil determinação experimental, a espessura da torta é estimada pela equação (AGUIAR, 1995):

$$M = Q \cdot t = L \cdot A \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.17)$$

sendo, M a massa de torta, Q a vazão mássica de sólido, A a área superficial de torta, ρ_p a densidade das partículas e t o tempo de filtração.

Isolando o L na Equação 2.17 chega-se a equação:

$$L = \frac{Q \cdot t}{A \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.18)$$

Substituindo a Equação 2.18 na Equação 2.16, obtém-se a equação:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_g \cdot Q \cdot V_f}{\varepsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot d_p^2} \quad (2.19)$$

Que usualmente é aplicada no cálculo da porosidade da torta de filtração.

SILVA et al. (2000), utilizando dados de queda de pressão em função do tempo de filtração, estimaram a porosidade de tortas de filtração pela correlação de Ergun com velocidades de filtração variando de 7,5 a 15,5 cm/s . Para velocidades acima de 11,5 cm/s os autores verificaram uma tendência de estabilização do valor da porosidade em aproximadamente 0,58, entretanto quando se aplicavam altas taxas de alimentação de sólidos (0,1482 g/s) esse comportamento não permanecia. Assim, a porosidade apresentou uma dependência de crescimento à interação entre as variáveis velocidade de filtração e taxa de alimentação de sólidos.

Equação de Kozeny-Carman, muito utilizada para calcular a queda de pressão por meio da deposição de partículas sobre um meio filtrante (CHENG; TSAI, 1998). Kozeny-Carman assumiu que o meio poroso podia ser representado por capilares, com superfície igual àquela das partículas que compunham o meio, e fixou o volume capilar igual ao volume de vazios do meio, propondo a correlação:

$$\Delta P = \frac{18 \cdot \mu \cdot V_f \cdot Q \cdot t}{A \cdot d_p^2 \cdot \rho_p \cdot C'} + \frac{2 \cdot K_{CK} \cdot (1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.20)$$

em que ΔP é a queda de pressão, C' é o fator de correção de Cunningham, μ é a viscosidade do fluido e ρ_p é a densidade da partícula e d_p é o diâmetro médio das partículas. A constante empírica (K_{CK}) usualmente é igual a 4,8 para partículas esféricas e 5,0 para partículas irregulares.

O fator de Cunningham pode ser obtido para gases em escoamento viscoso sobre esferas por meio da equação:

$$c' = \left\{ 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{dp \cdot \left[1,275 + 0,4e^{\left(\frac{-1,10 \cdot dp}{2 \cdot \lambda}\right)} \right]} \right\} \quad (2.21)$$

em que λ é o livre caminho médio das moléculas do gás.

HÖFLINGER et al. (1994) apresentaram um programa que simulava a deposição de um material pulverulento em um meio filtrante. Os autores simularam a filtração de 2000 partículas dispersas em ar. Assumiram uma distribuição granulométrica constante com diâmetro de partícula de $15\mu\text{m}$, velocidade superficial de filtração constante de $5,0\text{ cm/s}$, viscosidade do ar igual a $1,85e^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ e densidade de sólido igual a 2000 kg/m^3 . Adotaram a constante de Kozeny-Carman igual a dez. Os resultados dessa simulação mostraram que a torta era composta por três camadas de diferentes espessuras. A camada da superfície torta-ar era “fofa” e incompressível, a camada central era muito compressível e camada da interface torta-filtro era compactada, e não poderia ser comprimida sem destruir as partículas.

Equação de MacDonald, essa equação surgiu de algumas modificações na equação de Ergun 2.15 de modo a considerar a rugosidade das partículas, aumentando, assim, a faixa de abrangência da equação. Para tanto foram proposto dois modelos descritos a seguir.

Modelo para partículas rugosas, representado pela correlação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot V_f}{\varepsilon^3 \cdot d_p^2} + \frac{4,0(1 - \varepsilon) \cdot \rho_g \cdot V_f^2}{\varepsilon^3 \cdot d_p} \quad (2.22)$$

Modelo para partículas não rugosas, descrito pela correlação:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot V_f}{\varepsilon^3 \cdot d_p^2} + \frac{1,8(1 - \varepsilon) \cdot \rho_g \cdot V_f^2}{\varepsilon^3 \cdot d_p} \quad (2.23)$$

Equação de Endo, proposta por ENDO et al. (1998)), esses autores propuseram uma equação considerando o formato das partículas e a não homogeneidade do material particulado como fatores que influenciam a porosidade da torta de filtração. A correlação pode ser descrita por:

$$\frac{\Delta P_t}{L} = \frac{180 \cdot K \cdot (1 - \varepsilon)^2 \cdot \mu \cdot V_f}{\varepsilon^3 \cdot d_g^2 \cdot e^{(4 \cdot \ln^2 \sigma_g)}} \quad (2.24)$$

sendo ΔP_t a queda de pressão por meio da torta, σ_g o desvio padrão do diâmetro médio geométrico das partículas e d_g o diâmetro médio geométrico. Os autores incluíram nessa equação o fator de forma dinâmico, K e a influência da dispersão dos tamanhos das partículas.

A definição desse fator de forma dinâmico (K) é a razão entre a força de arraste que age na partícula em uma dada velocidade e a força de arraste em uma esfera de mesmo volume a mesma velocidade (ENDO et al., 1998) e pode ser calculado por:

$$K = \frac{C'_e}{C'_s} \cdot \left(\frac{d_e}{d_s} \right)^2 \quad (2.25)$$

nessa equação d_e é o diâmetro de uma esfera equivalente, d_s é o diâmetro de Stokes e C' é o fator de correção de Cunningham para os diâmetros d_e e d_s .

Substituindo a Equação 2.17 na Equação 2.24, temos a equação modificada proposta por (ENDO et al., 1998) que pode ser escrita por:

$$\Delta P_t = \frac{180 \cdot k \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \mu \cdot V_f}{\varepsilon^3 \cdot d_g^2 \cdot e^{(4 \cdot \ln^2 \sigma_g)}} \cdot \frac{Q \cdot t}{A \cdot \rho_p} \quad (2.26)$$

Na Literatura, existem muitas outras correlações que podem ser utilizadas para o cálculo da porosidade das tortas de filtração, mais não serão apresentadas nesse trabalho.

CHENG e TSAI (1998) determinaram a porosidade da torta de filtração utilizando três tipos de material pulverulentos (cinzas finas, rocha calcária e pó fino de Sae). Os diâmetros médios de partículas desses materiais eram respectivamente iguais a 6,28; 2,53 e 3,88 μm . Os autores trabalharam com velocidades de filtração variando de 1 a 9 cm/s , e as imagens foram obtidas por meio de um equipamento de sensor a “laser”. Foi encontrada uma equação empírica na tentativa de relacionar a velocidade superficial de filtração (V_f) com dados experimentais da porosidade média (ε). A Equação 2.27, para velocidade em cm/s , representou significativamente esses parâmetros, com um coeficiente de correlação (R^2) de 0,98:

$$\varepsilon = 1 - 0,14 \cdot V_f^{0,36} \quad (2.27)$$

em que V_f está em cm/s .

NEGRINI et al. (1998) trabalharam com rocha fosfática com densidade de partícula de 2,940 kg/m^3 e diâmetro de partícula de 18 μm , velocidades superficial de filtração de 5,4; 6,8; 8,1 e 8,9 cm/s e porosidades de 0,54; 0,57; 0,55 e 0,55 respectivamente. A Equação 2.28 foi a que melhor ajustou-se aos dados com coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,92:

$$\varepsilon = 1 - 0,18 \cdot V_f^{0,41} \quad (2.28)$$

em que V_f está em cm/s .

Método Direto

A porosidade da torta de filtração é um parâmetro muito importante para a filtração de gases. Durante muito tempo, esse parâmetro foi estimado teoricamente, partindo de equações existentes na literatura que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido. SCHIMIDT e LÖFFLER (1990) desenvolveram na Alemanha uma metodologia para obter experimentalmente valores de porosidade de tortas de filtração de gases. A técnica apresentada por esses autores consistia na obtenção de uma imagem representativa da torta de filtração por meio do seccionamento transversal da torta, após essa ser fixada em resina sintética, analisadas em microscópio. AGUIAR (1995) desenvolveu adaptação da técnica de SCHIMIDT e LÖFFLER (1990) para as condições e materiais existentes no Brasil.

Nessa técnica, a torta de filtração passa por um processo de pré-endurecimento pela passagem de um adesivo instantâneo arrastado por um fluxo de ar úmido. Segundo AGUIAR (1995), essa etapa é muito importante para que não ocorra um rearranjo de partículas na torta, modificando a sua estrutura durante a etapa seguinte, que consiste na penetração de um agente embutidor na estrutura, preenchendo todos os poros da camada de material particulado, sem causar variações nessa. Na etapa seguinte, a torta já endurecida é seccionada em quadrados ($1cm^2$) que são introduzidos em moldes cilíndricos de PVC com uma resina termo rígida. Posteriormente, as amostras são esmerilhadas e polidas. Por fim, elas são levadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) para obtenção de microfotografias. As imagens obtidas são, então, analisadas em um programa de tratamento de imagens em que a binarização é possível. Após essa binarização, as imagens são vistas apenas em dois níveis de cores permitindo, assim, que as áreas de pontos brancos (partículas)

e de pontos escuros (espaços vazios) sejam determinadas. Dessa forma, a porosidade é dada pela razão da área de espaços vazios pela área total examinada.

SCHIMIDT e LÖFFLER (1991) determinaram, por meio de medidas diretas, a porosidade de tortas de filtração de gases, utilizando a rocha calcária (com diâmetro médio de partícula de $3,5\mu\text{m}$) como material pulverulento. A velocidade superficial de filtração desse estudo foi de $4,58\text{cm/s}$, a queda de pressão máxima igual 1500 Pa e os valores da porosidade para esses testes variaram de 0,79 a 0,89. Nessas mesmas condições, em 1983, esses autores obtiveram tortas de espessuras diferentes para queda de pressão máxima de 500 Pa , 1000 Pa e 2000 Pa para cada torta. Nesse trabalho pôde-se verificar que variação da porosidade na torta era maior para as tortas mais espessas. Os pesquisadores encontraram uma porosidade de 0,80 a 0,85 para a torta mais fina. Para a torta intermediária essa variação foi de 0,70 a 0,85 e para a mais grossa apresentou uma variação entre 0,69 e 0,82.

HÖFLINGER et al. (1994) apresentaram um programa que simulava a deposição de um material pulverulento em um meio filtrante. Os autores simularam a filtração de 2000 partículas dispersas em ar. Assumiram uma distribuição granulométrica constante com diâmetro de partícula de $15\mu\text{m}$, velocidade superficial de filtração constante de $5,0\text{ cm/s}$, viscosidade do ar igual a $1,85e^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ e densidade de sólido igual a 2000 kg/m^3 . Adotaram a constante de Kozeny-Carman igual a dez. Os resultados dessa simulação mostraram que a torta era composta por três camadas de diferentes espessuras. A camada da superfície torta-ar era “fofa” e incompressível, a camada central era muito compressível e camada da interface torta-filtro era compactada, e não poderia ser comprimida sem destruir as partículas.

AGUIAR (1995) estudou a deposição e remoção da camada de pó formada na filtração de gases em filtros de tecidos. Nesse estudo, foram realizados vários ensaios de filtração, com velocidade superficial de filtração constante de $7,4\text{ cm/s}$, material pulverulento sendo calcário dolomítico com diâmetro médio de superfície-volume de 2,5; 3,3; 6,9; e $10,7\mu\text{m}$ com vazão de alimentação de pó para cada fração de 0,66; 0,61; 0,16 e $0,31\text{ g/min}$. A autora observou que a perda de carga no filtro aumentou sensivelmente com a diminuição do tamanho da partícula. A porosidade, determinada pelo método direto (experimental), apresentou um pequeno aumento à medida que se afastava do tecido, comportamento observado nas quatro frações do calcário dolomítico estudadas. A porosidade diminuiu à medida que o diâmetro médio da partícula aumentou. Ao se estudar quatro tortas

com espessuras diferentes da mesma fração granulométrica do calcário dolomítico, verificou-se que a porosidade da torta diminuiu na interface tecido-torta com o aumento da espessura. Já a porosidade se manteve constante na interface torta-ar. Esses resultados levaram à conclusão de que a torta de filtração era compressível e que as correlações apresentadas na literatura, permitiam estimar a porosidade média da torta de filtração.

Utilizando um material puerulento orgânico, derivado da mandioca (polvilho doce) na filtração de gases, LUCAS (2000) não obteve resultados satisfatórios aplicando a técnica de AGUIAR (1995) para determinar a porosidade da torta de filtração de gases. As imagens da seção transversal das tortas de polvilho doce, geradas no MEV, não apresentaram um contraste adequado, isso porque, tanto o polvilho como a resina utilizada no embutimento eram de materiais orgânicos.

NETO (2002) estudou a porosidade de tortas em filtro de mangas operando na filtração de gases com rocha fosfática de diâmetros de partículas iguais 5, 18 e $31\mu\text{m}$, velocidade superficial de filtração variando de 5 a 15 cm/s e queda de pressão máxima de 100 mmH_2O . Esse autor observou uma grande discordância nos valores experimentais obtidos no filtro de mangas com os estimados pelas correlações empíricas encontradas na literatura. Esses resultados levaram-no a realizar um estudo estatístico para avaliar a relação da porosidade (método direto) com variáveis do processo.

FARGNOLI (2010), utilizando talco e rocha fosfática como material particulado, encontrou o mesmo comportamento para valores de porosidade estimados pelas equações da literatura em relação aos encontrados pelo método direto, apesar de seus valores diferirem entre si, sendo os desvios maiores para as tortas formadas por rocha e menores para as tortas formadas por talco a velocidade variante.

2.7 PROPRIEDADE DAS PARTÍCULAS

Como já mencionado, as propriedades do material particulado que será coletado influenciam na tomada de decisão pelo equipamento que deve ser utilizado, assim como, no projeto desses equipamentos. De acordo com SVAROVSKY (1981), a caracterização das propriedades primárias das partículas e a correlação com as propriedades secundárias do sistema particulado como

um todo são problemas comuns do estudo sobre materiais particulados. A Tabela 2.3 apresenta algumas dessas propriedades primárias e a relação dessas com as propriedades secundárias:

Tabela 2.3: Propriedades primárias e secundárias das partícula Fonte: AZEVEDO (2009)

PROPRIEDADES PRIMÁRIAS	
Tamanho	Distribuição granulométrica, diâmetro médio
Forma	Distribuição: forma em função
Densidade	Distribuição: densidade em função
Área Superficial da Partícula	Área superficial
PROPRIEDADES SECUNDÁRIAS	
Rigidez	Propriedades do escoamento e manuseio.
Resistência	Empacotamento
Dureza	Tratamento do material: moagem, polimento, etc.
Porosidade	Permeabilidade

O tamanho das partículas a ser coletada em um dado equipamento influencia tanto na escolha, como no projeto deste equipamento. Dessa forma o tamanho da partícula é um dos fatores determinantes para o a eficiência de um equipamento de coleta de material particulado.

Segundo SVAROVSKY (1981), a determinação do tamanho da partícula deve ser precedida da definição do parâmetro que será utilizado para tal e de como serão apresentados os dados da distribuição. A escolha dos parâmetros que representam o tamanho de partícula depende do formato dela. O tamanho de uma partícula esférica homogênea é definido unicamente por seu diâmetro, ao passo que, para uma partícula cúbica, o único parâmetro necessário é a dimensão da aresta. Para partículas irregulares, o tamanho de partícula depende do método escolhido para realizar a medida sendo os mais comuns: a área projetada, área superficial e o diâmetro entre outros (ALLEN, 1997).

É possível observar e medir partículas por meio de análise microscópica. Utilizando o microscópio, pode-se medir o diâmetro de cada partícula individualmente e, ao dividi-lo pelo número total de partículas, obtém-se o diâmetro médio, ou seja, um único número que representa a partícula ou o tamanho de partícula (AZEVEDO, 2009). No entanto, deve-se ter muita cautela ao fazer conversões entre número único, comprimento, volume e massa médios. Se o dado desejado for massa ou volume médio, será necessário fazer a conversão entre o número médio para a massa média. Matematicamente, é muito simples, entretanto essa conversão pode aumentar consideravelmente

o erro da medida (RAWLE, 2005)). Para esse autor, a descrição de um objeto tridimensional com apenas um número é o fator que imprime maior dificuldade na determinação do tamanho de partícula. Assim, vários tipos de diâmetros de partícula são utilizados na caracterização do tamanho das partículas.

Diâmetro Equivalente é um termo muito utilizado nos estudos dos aerossóis. Partindo do conceito de diâmetro equivalente, é possível chegar a várias definições para o tamanho de partícula, essas definições são relacionadas tanto com as propriedades como com o comportamento das mesmas. Quando uma partícula é analisada por uma dada técnica de medição, o dado registrado corresponde a uma propriedade física específica. Portanto, o termo diâmetro equivalente pode ser definido como o diâmetro de uma esfera de igual valor, para uma dada propriedade física específica da partícula irregular que esteja sendo medida. O diâmetro aerodinâmico pode exemplificar bem, pois esse é o diâmetro de uma esfera de densidade unitária, que tem a mesma velocidade terminal de sedimentação da partícula em estudo.

Devido à complexidade da tarefa de medir o tamanho de uma partícula, existem inúmeras definições que dependem da técnica de medição utilizada ou do uso para o qual o parâmetro é atribuído, a Figura 2.13 ilustra a diversidade de definições para o diâmetro de uma partícula. Assim, diâmetros equivalentes são determinados pela medida de uma propriedade física específica da partícula relacionada por uma dimensão linear e uma mesma partícula pode apresentar diferentes diâmetros equivalentes em função da propriedade física avaliada.



Figura 2.13: Diâmetros Equivalentes Utilizados na Determinação do Tamanho de uma Partícula

Como exemplos de diâmetros equivalentes, podem-se citar: diâmetro de sedimentação (d_{sed}), diâmetro de arraste (d_s), diâmetro de superfície (d_s), diâmetro de área projetada (d_{ap}), diâmetro de perímetro (d_p), diâmetro de Feret (d_F), diâmetro mínimo (d_{min}), diâmetro de queda livre (d_{ql}), diâmetro de Stokes.

O tamanho de partícula isoladamente não é de grande interesse, pois a faixa granulométrica de uma corrente gasosa a ser limpa é bastante variável, assim, a distribuição granulométrica de partículas é de grande importância e comumente é representada por meio de distribuição cumulativa. No gráfico de distribuição, a abscissa representa o tamanho de partícula e a ordenada, a porcentagem (menor ou maior que um dado tamanho). Por meio desse tipo de distribuição, pode-se ler o tamanho médio e a porcentagem entre dois tamanhos.

Ao realizar ensaios de filtração com o concentrado fosfático e com polvilho doce com diferentes diâmetros, RODRIGUES (2006) observou que o maior diâmetro de partículas resultou em melhor acomodação tanto interna (refletida no maior tempo de filtração interna) quanto superficial da torta, uma vez que a resistência específica da torta de partículas grossas foi inferior àquela apresentada pela torta constituída por partículas finas.

AGUIAR e COURY (1996) relataram essa mesma influência do diâmetro. Os autores concluíram que as partículas de maiores diâmetros efetuam um recobrimento menos eficiente das fibras, resultando em menor queda de pressão. As menores partículas da distribuição controlam muitos aspectos dos ciclos de filtração, pois são elas que penetram no tecido no início da filtração e formam a torta de filtração subsequente. São as partículas pequenas que mais contribuem com a área superficial das partículas e com a resistência específica da torta de filtração (WAKEMAN, 2007).

Outra propriedade fundamental é o formato das partículas, porque afeta o empacotamento de partículas e, conseqüentemente, características como a densidade, porosidade, permeabilidade, coesão e o comportamento da torta de filtração (ALLEN, 1997). Existem vários métodos para analisar a forma das partículas, entre os quais se encontra o uso de diversos coeficientes e fatores de forma, curvatura, descrição por meio de formas sólidas, funções matemáticas, dimensões fractais entre outros (SVAROVSKY, 1981). O formato pode ser determinado por número, superfície ou volume.

Os termos geralmente utilizados para definir a forma de uma partícula (esférica, irregular, ar-

redondada, entre outros) não são adequados para determinar o fator de forma da partícula, pois não podem ser inseridos em equações que necessitem desse parâmetro. A relação numérica entre várias medidas da partícula depende da sua forma e uma relação adimensional dessas medidas é chamada fator de forma. A relação entre as dimensões medidas da partícula e seu volume ou área superficial é chamada coeficiente de forma (ALLEN, 1997). Os fatores de forma geralmente utilizados para caracterizar as partículas são sua circularidade, aspecto e convexidade. A circularidade quantifica o quanto o formato da partícula projetada se aproxima de um círculo perfeito. Ela é definida como a relação entre o perímetro de um círculo de mesma área (A) da partícula de interesse dividido pelo perímetro da imagem da partícula. O cálculo desse parâmetro é feito pela equação:

$$\phi = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2} \quad (2.29)$$

O valor desse parâmetro varia entre 0 e 1, sendo que um círculo perfeito tem circularidade 1.

ENDO e ALONSO (2001) determinaram a porosidade de tortas de filtração de gases para diferentes tipos de materiais pulverulentos trabalhando com partículas esféricas monodispersas e partículas irregulares polidispersas. Os autores concluíram que os valores de porosidade são maiores para as partículas de formatos irregulares e cúbicos.

BOSKOVIC et al. (2005) investigaram a influência da forma das partículas na filtração utilizando nano partículas, esféricas e cúbicas. Os resultados mostraram que a eficiência da filtração foi bem diferente entre os dois tipos de partículas, sendo menor para as partículas cúbicas e essa diferença aumentou com o aumento do tamanho das partículas. Os autores concluíram que a razão para a diferença estava no movimento das partículas ao longo da superfície das fibras do tecido.

AZEVEDO (2009) estudou a porosidade de diversas partículas orgânicas por meio do método indireto utilizando várias correlações encontradas na literatura. O autor concluiu que as equações utilizadas apresentaram o mesmo comportamento e os valores obtidos pela correlação de Ergun foram menores que os obtidos por outras correlações. Já a correlação de Endo et al. apresentou os maiores valores de porosidade (exceto para o polvilho doce). O autor, mantendo as mesmas condições operacionais de filtração, para o mesmo material particulado e diferentes meios filtrantes, verificou que os valores de porosidade deram diferentes. Portanto, concluiu que a porosidade depende não só da interação partícula-partícula, mas também das propriedades do tecido, da interação partícula-tecido e das características físicas da partícula (como seu formato). Por fim,

averiguou que as partículas menos esféricas (amido de milho) apresentaram maiores valores de porosidade e as partículas achatadas (farinha de trigo) formaram tortas com os menores valores de porosidade entre os materiais estudados.

2.8 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)

O estudo do movimento dos fluidos vem sendo desenvolvido há anos. Este movimento é de grande importância para a humanidade, pois rege os mais diversos fenômenos naturais e, é fundamental na indústria. De acordo com FORTUNA (2000) o estudo da mecânica dos fluidos ocorreu de forma experimental muito antes do que de forma matemática. As descrições matemáticas do comportamento dos fluidos só ganharam força no século XIX, na forma das equações de Navier-Stokes. Dependendo das propriedades do fluido e do escoamento, essas equações podem ser escritas de muitas formas. As soluções analíticas para as equações de Navier-Stokes só foram determinadas para alguns poucos casos. Esta dificuldade decorre do fato das equações de Navier-Stokes serem equações diferenciais parciais (EDPs) não-lineares, e a teoria dessa classe de equações não está suficientemente desenvolvida para permitir a obtenção de soluções analíticas. Com o advento do computador digital a partir da década de 50, surgiu a alternativa da solução numérica das equações de Navier-Stokes utilizando técnicas computacionais. Para muitos problemas reais de Engenharia o tratamento computacional é a forma mais prática, se não única de se obter os dados sobre o escoamento.

A fluidodinâmica computacional é a área da computação científica que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor. Com os avanços contínuos na capacidade de processamento dos novos computadores, assim como a melhora em termos de *hardware*, têm produzido um aumento no uso da simulação fluidodinâmica computacional. A complexidade das equações de conservação de quantidade de movimento, energia e massa, entre outras equações, há pouco tempo tornava inviável a solução de uma série de problemas de engenharia, devido, principalmente, à baixa capacidade computacional.

As aplicações da simulação computacional de processos envolvendo fluidos e transferência de calor são muitas. Um exemplo é o auxílio no projeto e otimização de equipamentos, diminuindo os

gastos com protótipos de bancada, que consomem um tempo no desenvolvimento de um projeto. Emerge, assim, uma das vantagens oferecidas pela simulação. A combinação entre simulação e experimentação é de fundamental importância na Engenharia.

A expansão da utilização de códigos de CFD data de 1980. Em que as grandes empresas investiram nestes códigos, tanto em termos de utilização, como em desenvolvimento e aprimoramento dessas rotinas. Atualmente os pacotes comerciais CFD são baseados em rotinas numéricas complexas, capazes de solucionar as complicadas equações matemáticas para descrever o comportamento do movimento dos fluidos e possibilitar a realização de análises do escoamento do fluido. BÉTTEGA e CORRÊA (2009)

O processo de solução de um problema físico usando CFD pode ser resumido conforme o fluxograma apresentado na Figura 2.14. O tratamento do problema envolve, inicialmente, uma idéia geral, com a verificação do tipo de problema: transiente ou estacionário, a definição das variáveis envolvidas e da geometria. O passo seguinte consiste na geração da malha e na especificação do escoamento de forma a estabelecer as equações governantes, as condições de contorno, as propriedades físicas (constantes ou não) e as relações constitutivas (equações de estado, equações de transporte e equações de taxas de reações químicas). Então, tem-se a resolução do problema por meio das técnicas numéricas empregadas no simulador. A resolução de um problema de CFD, independentemente do *software*, se dá em três etapas: pré-processamento; solução numérica do problema e pós-processamento.

O conjunto das atividades envolvidas na montagem e elaboração de um problema de CFD que acontecem antes da etapa de solução numérica é denominado de pré-processamento. Nas atividades mostradas no fluxograma da Figura 2.14, estão incluídas no pré-processamento as etapas de tratamento do problema, geração da malha e especificação do escoamento (geometria), além da definição do método numérico a ser empregado bem como os parâmetros necessários para a resolução.

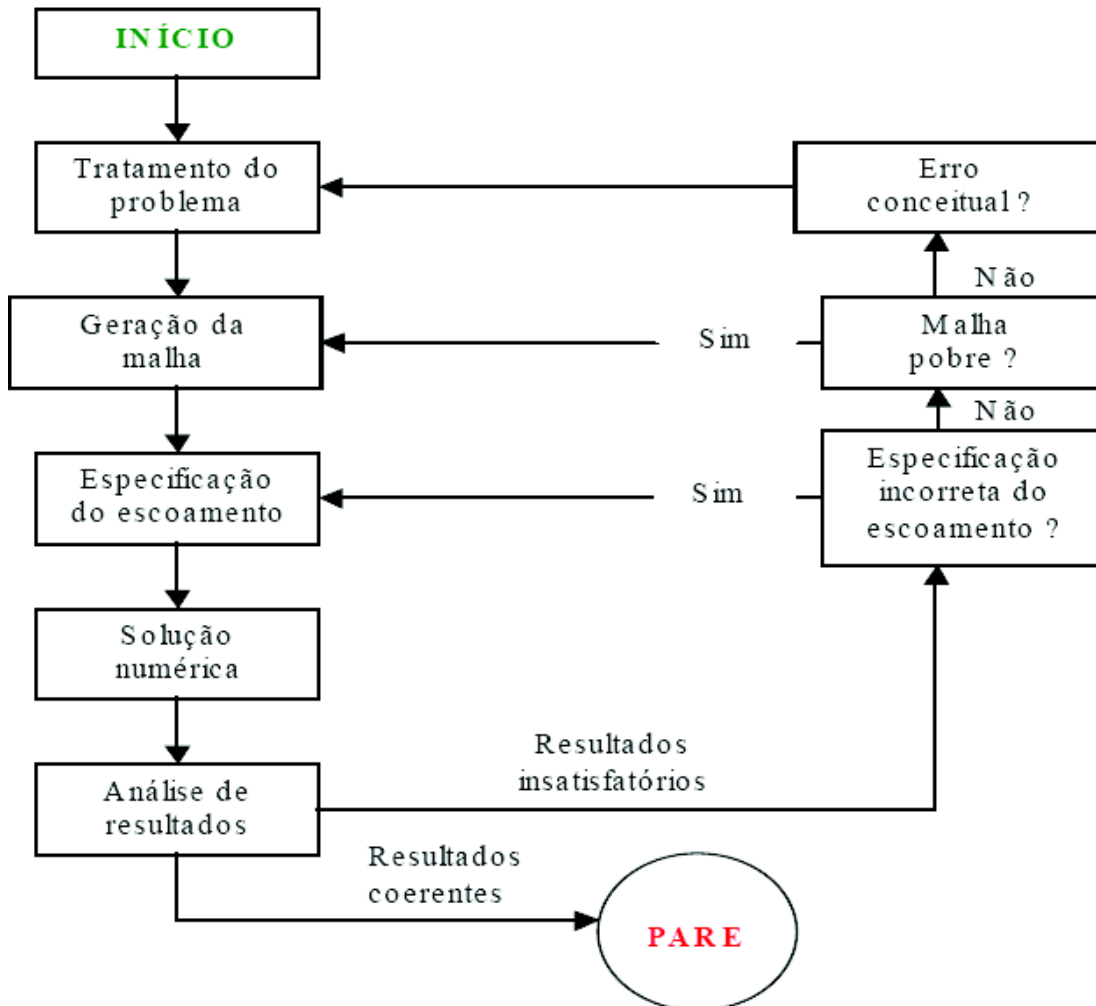


Figura 2.14: Fluxograma para Resolução de um Problema Utilizando CFD

Fonte:PORCIÚNCULA (2007)

2.8.1 Geração da Malha

A malha computacional do problema deve ser capaz de representar corretamente o seu domínio físico. Porque essa é a região sobre a qual se deseja conhecer o comportamento dos fenômenos de transporte presentes. Ação da malha consiste na subdivisão do domínio em várias partes ou células computacionais, em que as equações serão discretizadas e resolvidas. Se a geometria for tridimensional, então o espaço em questão será composto por pequenos elementos de volume cujo tamanho é fixo ou variável, de acordo com a geometria em estudo e das características do problema. A parte mais difícil e também a mais importante do pré-processamento é a construção

da geometria e a geração da malha. A qualidade desse trabalho final terá grande influência na qualidade da solução e a facilidade para obtê-la.

Na montagem da malha, deve-se levar em consideração o fenômeno físico envolvido, para que se possa refiná-la nas regiões de gradientes elevados, a fim de permitir a convergência para a solução correta. Uma vez estabelecidas a geometria e a malha, as outras etapas se tornam relativamente simples se o simulador apresentar uma interface gráfica adequada. As condições de contorno especificadas podem ser visualizadas em cada parte da geometria e as propriedades dos fluidos podem ser facilmente ajustadas. Caso as propriedades físicas variem durante o processo é necessária a introdução da expressão matemática, que represente essa variação (UDF). Fatores como precisão, número máximo de iterações e parâmetros usados em métodos numéricos também são ajustados.

2.8.2 Solução Numérica

A solução numérica consiste na solução iterativa do problema. No pós-processamento as soluções são visualizadas e interpretadas. Outros cálculos também podem ser realizados a partir dos resultados obtidos, como o de valores médios das variáveis de interesse (velocidade, pressão, temperatura, tensão de cisalhamento), além da representação dos perfis dessas variáveis por meio de gráficos e superfícies de contorno. Campos vetoriais e linhas de corrente também podem ser visualizados e efeitos como a turbulência podem ser previstos.

Algumas características são importantes no momento da escolha de um programa de simulação CFD, entre elas podem-se citar a geometria, o tipo de escoamento, efeitos de transferência de calor, número de fases e componentes, presença de reações químicas, resultados almejados, interface, velocidade da solução, disponibilidade de *hardware*, entre outras.

2.8.3 Aplicações de CFD em Operações de Filtração

Apesar do grande número de estudos experimentais na de filtração de gases em filtro de tecidos, trabalhos envolvendo CFD aplicados à filtração são relativamente novos.

TUNG et al. (2005) estudaram os efeitos do tratamento de calandragem de um filtro de tecido sobre a permeabilidade dos filamentos com relação ao fenômeno de deposição de partículas na fase inicial de filtração, por meio de análise quantitativa das forças microscópicas. O fluxo padrão e a resistência ao fluxo de fluido dos interstícios após a calandragem foram obtidos numericamente utilizando o *software* FLUENT. Com base nos dados numéricos da fase contínua, foi concebido um programa para simular o comportamento transitório de entupimento dos poros e formação da torta de filtração, com abordagem lagrangiana, para diferentes tecidos calandrados com diferentes porosidades e permeabilidades. Os resultados mostram que, no caso dos tecidos agulhados o fluxo é predominantemente através dos fios do tecido, enquanto para tecidos trançados o fluxo ocorrerá ao redor dos fios. Portanto nas filtrações em tecidos trançados frouxamente pode correr um aumento desfavorável, mas inevitável do entupimento dos poros. Os resultados simulados por estes autores mostraram que, apesar da resistência ao fluxo de gás aumentar nos tecidos após a calandragem, a permeabilidade é retificada e o entupimento dos poros do filtro é menor. Após o tratamento de calandragem na superfície dos tecidos, a formação da torta se mostrou em conformidade com a Lei de Bloqueio para todos os tipos de poros. Esta lei de bloqueio foi proposta por Hermans e Bredéem em 1935, para estudar o fenômeno do entupimento dos poros por partículas depositadas no início da filtração. Eles descobriram que o inverso do volume filtrado era proporcional ao volume do filtrado gerado por um expoente, “n”, e sugeriu quatro possíveis mecanismos para medir o bloqueio do meio filtrante.

WANG et al. (2006) adotaram uma abordagem convencional para a modelagem da permeabilidade de tecidos multifilamentos, em que os autores consideraram para a construção da malha um filamento individual, considerando a espessura do meio poroso homogênea, e as equações de fluxo de ar através da tela foram resolvidas para monofilamento. Nesse trabalho, utilizou-se pela primeira vez, a geometria 3D de um tecido multifilamento idealizado, no qual os filamentos eram acondicionados em um arranjo hexagonal, gerado para computar sua permeabilidade e comparar com o modelo anisotrópico homogêneo de GERBAT (1990). Embora os autores tenham encontrado resultados relativamente bons, esses resultados indicaram que o modelo Gebart subestima a permeabilidade dos tecidos multifilamentos, mesmo em frações de fios de alto volume de sólido.

Segundo JAGANATHAN et al. (2008), a determinação da permeabilidade do meio filtrante é de grande importância para muitas indústrias. Embora existam vários modelos analíticos 2D e 3D

desenvolvidos para prever a permeabilidade das fibras desordenadas, não existem muitos trabalhos numéricos que comparem as previsões desses modelos com a média real. Nesse trabalho os autores apresentaram uma série de simulações numéricas realizadas na microestrutura de uma fibra real de meios filtrantes. Um procedimento eficiente é apresentado para a reconstrução de imagens 3D a partir das imagens 2D dos meios filtrantes e processá-los para a realização de simulação de fluxo de fluido. Foram obtidas imagens digitais de um tecido fibroso para calcular sua permeabilidade, por exemplo, Imagem digital volumétrica (DVI). Esses resultados foram comparados com aqueles obtidos a partir das equações analíticas dadas na literatura. Em particular os autores verificaram que a permeabilidade de um material estava intimamente previsto pelos modelos de camadas anisotrópicas.

QIAN e WANG (2009) simularam a filtração de gases em filtro de mangas, utilizando a fluidodinâmica computacional. Esses autores estudaram a distância horizontal e vertical das fibras juntamente com o número de Reynolds para descobrir a combinação que levava a maior eficiência. A malha computacional representava as tramas do filtro de tecido, que foi construída de filamentos com diferentes dimensões. As soluções numéricas foram realizadas utilizando o *software* Fluent 6.1. O desempenho do filtro de tecido para diferentes parâmetros de geometria e condições de funcionamento, incluindo distância horizontal e vertical, e a velocidade nominal foram calculadas. Os efeitos desses parâmetros de geometria e das condições de funcionamento de filtração, assim como a eficiência e a queda de pressão foram estudadas utilizando a metodologia de superfície resposta (RSM) por meio do *software* Minitab V14. Os autores obtiveram dois modelos polinomiais de segunda ordem que correlacionam o efeito dos três fatores estudados. Os resultados mostraram que a distância vertical e horizontal das fibras, assim como a velocidade de filtração influenciavam a eficiência de filtração e a queda de pressão através do meio filtrante. Os autores encontraram como condições ótimas, a distância horizontal de 3,8 vezes o diâmetro da fibra, a distância vertical de 4,0 vezes o diâmetro da fibra o número de Reynolds de 0,98 para a realização da filtração, com maior eficiência de filtração, mantendo uma queda de pressão aceitável.

LO et al. (2010) estabeleceram um modelo numérico utilizado na análise fluidodinâmica computacional (CFD), para observar o comportamento de fluxo transiente em filtros de cartuchos plisados em um coletor de pó durante a limpeza por jato pulsante. Os resultados numéricos apresentaram boa concordância com os dados de teste do filtro durante períodos importantes, como a

pressão durante a abertura da válvula e, que os maiores erros de previsão sobre pressão ocorreram durante o período de desaceleração provavelmente devido à uniformidade da permeabilidade dos filtros. Isso confirmou que o modelo numérico, demonstrou a eficiência de limpeza e a qualidade da limpeza local em três filtros diferentes, filtros cartuchos com diferentes dimensões e plissado. Dados calculados a partir da pressão estática média nas superfícies dos filtros foram mais estreitamente correlacionada com a eficiência de limpeza de pressão. A superfície de distribuição de pressão estática ao longo de todos os filtros de cartuchos mostrou que a área superior do filtro é difícil de ser limpa devido a baixa pressão gerada pelo jato pulsante. Nos filtros de cartuchos plissados foram encontrados os casos de maior limpeza incompleta devido à grande variação de distribuição de pressão ao longo do filtro. Os autores concluíram que, informação como distribuição média de assim como a distribuição da superfície do filtro é de difícil obtenção experimental, entretanto esses dados são tratáveis com a ferramenta CFD, e essa análise é útil para sistemas de otimização e projetos de filtros.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho, bem como a descrição das etapas realizadas para obtenção dos resultados, e a metodologia empregada.

3.1 Materiais

3.1.1 Material Particulado

O material particulado utilizado nos ensaios de filtração desse trabalho foi o concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), fornecido pela empresa FOSFÉRTIL S.A. O concentrado fosfático é um material higroscópico e ficava armazenado em estufa, haja vista que durante a filtração o material não poderia atingir uma umidade superior a 20%, porque causaria empastamento no tecido.

A Figura 3.1 apresenta a micrografia do material particulado, obtida por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

A densidade das partículas foi determinada por picnometria a Hélio, por meio do equipamento AccuPyc 1330, da Micrometrics, pertencente ao Laboratório de Controle Ambiental do DEQ/UFSCar. O valor da massa específica foi de $2,79 \text{ g/cm}^3$, obtido pela média de três análises.

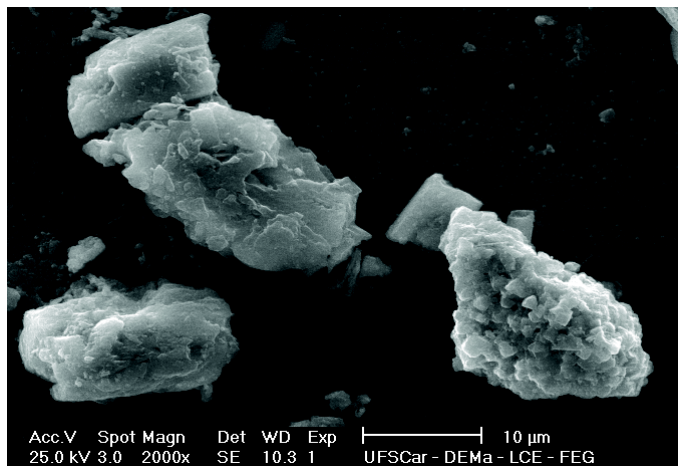


Figura 3.1: Foto em microscopia eletrônica da rocha fosfática

A esfericidade das partículas, determinada com auxílio do programa Image Pro Plus 7.0[®] por meio da média das esfericidades das partículas da FIGURA 3.1 e da Equação 2.29 foi de 0,52

A distribuição granulométrica das partículas apresentada na Figura 3.2 foi realizada no equipamento Malvern Mastersizer Microplus (Laboratório de Controle Ambiental do DEQ/UFSCar). A análise é realizada por meio da técnica de espalhamento de luz laser de baixo ângulo (LALLS - Low Angle Laser 66 3.1. Materiais Light Scattering), conhecida genericamente por “espalhamento de luz”. Esse método de análise de tamanho de partículas, também conhecido como difração a laser, consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, que são relacionados ao diâmetro da partícula. O valor médio encontrado foi de $5\mu\text{m}$.

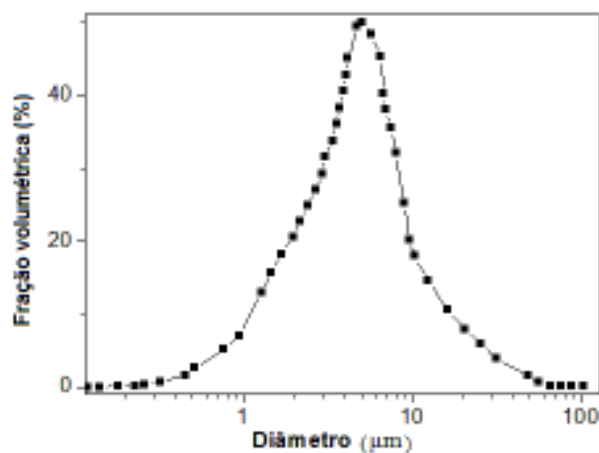


Figura 3.2: Distribuição Granulométrica do Material Particulado

3.2 Meio Filtrante

O meio filtrante utilizado neste trabalho foi feltro de poliéster fornecido pela empresa Gino Cacciari. Esse tecido foi submetido a tratamento de calandragem e chamuscamento em uma de suas faces. Para a realização dos ensaios de filtração o meio filtrante era cortado em seções circulares de 18 cm de diâmetro, resultando em uma área filtrante igual a 254 cm². Além das características fornecidas pelo fabricante, foram realizados alguns testes de caracterização do meio filtrante, visando obter melhor avaliação dos resultados. Foram investigadas a porosidade, a permeabilidade e o diâmetro linear da fibra. As superfícies do tecido foram avaliadas por meio de microfotografias de uma amostra do tecido. A permeabilidade e a porosidade desse meio foram determinadas experimentalmente. A porosidade foi determinada por meio de fotografias da seção transversal do meio filtrante em microscópio eletrônico de varredura e posterior análise de imagem no software Image pró Plus 7.0[®]. A permeabilidade foi obtida experimentalmente, variando-se a velocidade superficial através do elemento filtrante e determinando-se a perda de carga resultante. Com esses dados construíram-se as curvas de perda de carga em função da velocidade superficial, para cada tecido, baseadas na Equação 2.13. A curva utilizada para esse cálculo está apresentada no Apêndice A. Os resultados da caracterização do meio filtrante se encontram sumarizados na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Resultado da caracterização do meio filtrante

Poliéster	
Especificação	1016P
Contextura	Feltro Agulhado
Gramatura (g/m^2)	534
Espessura (mm)	2,5
Diâmetro médio linear de fibras (μ)	21,0
Distância entre fibras na vertical (μ)	18 - 54
Distância entre Fibras na Horizontal (μ)	4 - 36
Porosidade de Ergun	0,88
Permeabilidade ao ar (m^2)	$5,87 \cdot 10^{10}$

A Figura 3.3 apresenta a superfície do tecido utilizado nesse trabalho gerada no MEV, do Instituto de Química da USP/São Carlos (IQSC), com uma ampliação de 50 e 500 vezes respectivamente.

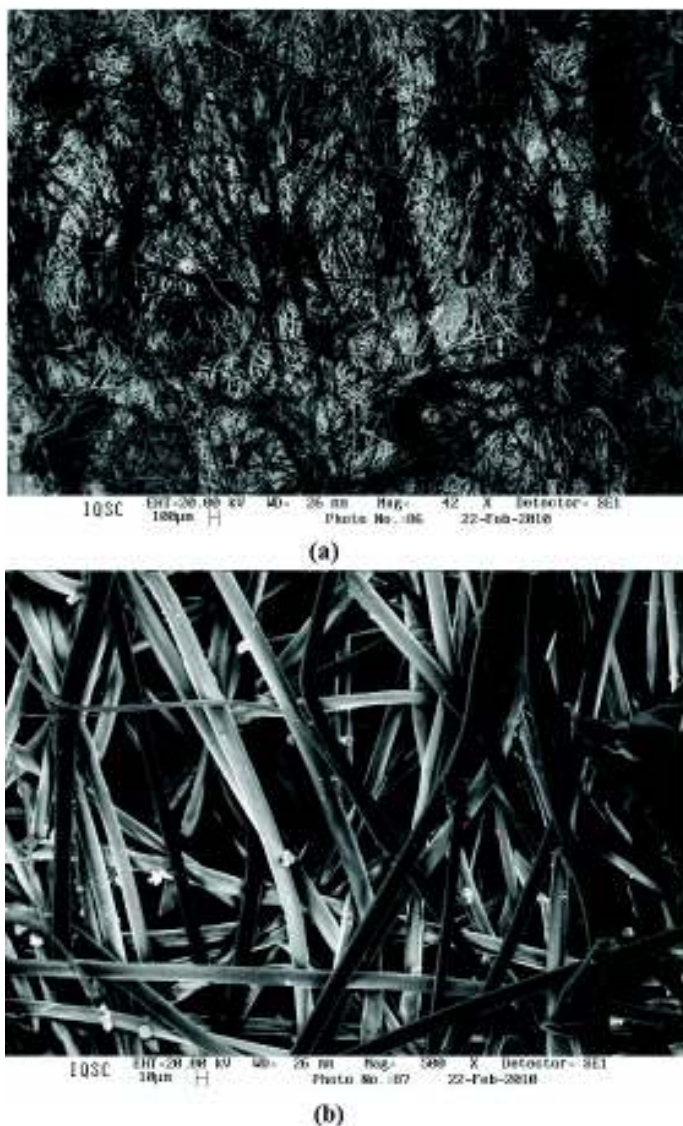
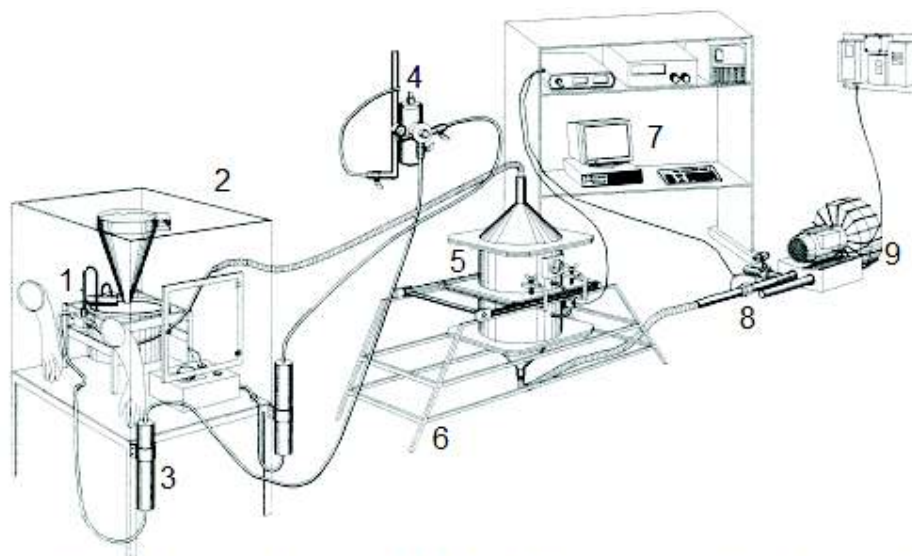


Figura 3.3: Micrografia da Superfície de Poliéster Tratado, Gerada no MEV do IQSC USP (a) com aumento de 50 vezes; (b) com aumento de 500 vezes

3.3 Unidade Experimental

O equipamento de filtração utilizado neste trabalho pertence ao Laboratório de Controle Ambiental do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. É constituído por um alimentador de partículas, uma caixa de filtração, um soprador, um sistema de aquisição de dados, um desumidificador e ar comprimido, apresentados na Figura 3.4



1 - alimentador de pó; 2 - caixa de desumidificação; 3 - coluna de desumidificação; 4 - linha de ar comprimido; 5 - caixa de filtração; 6 - suporte do equipamento; 7 - sistema de aquisição de dados; 8 - placa de orifício; 9 - soprador de ar

Figura 3.4: Esquema Geral do Equipamento de Filtração e Limpeza

3.3.1 Alimentador de Partículas

O sistema de alimentação de sólido era constituído por um prato giratório de aço inoxidável com um sulco circular. Esse sulco era preenchido com material particulado através de um cone. Um motor alocado junto a esse cone promovia vibrações que auxiliavam no preenchimento eficiente do sulco. De forma a assegurar uma alimentação homogênea, adaptou-se na saída do cone de alimentação um nivelador em forma de anel. O desenho esquemático desse sistema pode ser visto na Figura 3.5.

Na etapa de filtração, o pó era depositado no sulco circular como descrito acima e o alimentador de pó era dotado de um controlador de velocidade de rotação expresso em porcentagem (%) da velocidade máxima. Antes de cada experimento, era realizada uma calibração do prato, de forma a garantir uma rotação de 0,68 rpm do prato, ou seja, o prato completava uma volta em torno do seu eixo em um minuto e 50 segundos, essa calibração garantia que a mesma massa era alimentada em todos os experimentos (0,031mg/s). Um aspirador tipo Venturi succionava o pó continuamente para a corrente de ar gerada pelo soprador. Esse sistema foi isolado em uma caixa de acrílico vedada, de forma a garantir o controle da umidade da corrente gasosa, pois a filtração deve ser

realizada à umidade menor que 20%, de forma a evitar o empastamento da torta.

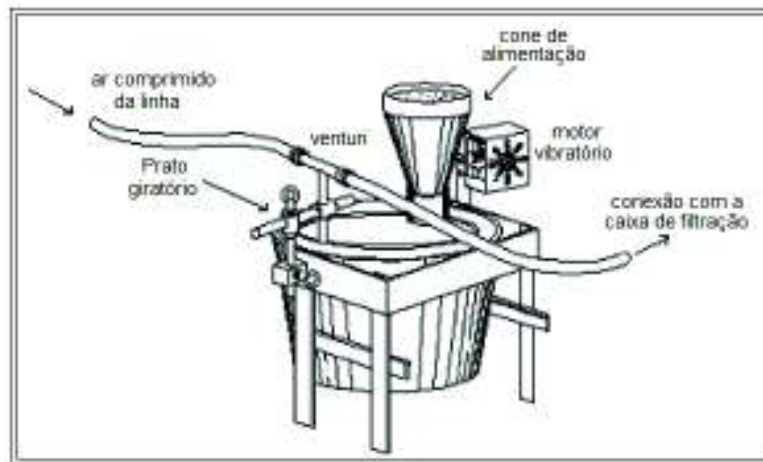


Figura 3.5: Sistema de Alimentação de Sólidos

3.3.2 Caixa de Filtração

A caixa de filtração foi construída em PVC sendo constituída de dois cilindros acoplados a dois cones. O feltro de poliéster circular com área de filtração de $254,47\text{cm}^2$ era fixado entre dois moldes de aço inoxidável, que por sua vez eram encaixados como uma gaveta entre os dois cilindros de PVC. A tampa cônica superior se conectava ao alimentador de pó, enquanto a tampa inferior se conectava ao soprador. O soprador sugava o ar durante a filtração e para a operação de limpeza ocorria uma inversão do fluxo de ar, que era soprado, essa inversão dependia do sentido de rotação do motor, que era controlado por um sistema computadorizado. Esse sistema foi denominado caixa de filtração e pode ser visto em detalhes na Figura 3.6. A Tabela 3.2 apresenta as dimensões da caixa de filtração.

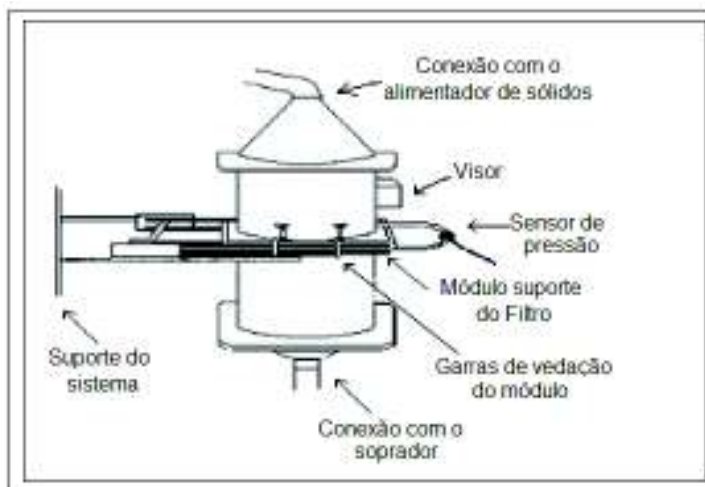


Figura 3.6: Caixa de Filtração

Tabela 3.2: Dimensões geométricas da caixa de filtração

Parte Componente	Dimensão (m)
Comprimento da Câmara de Filtração	0,5925
Diâmetro do Cilindro da Câmara de Filtração	0,1950
Comprimento do Cilindro da Câmara de Filtração	0,3825
Comprimento do Duto de Alimentação	0,2000
Diâmetro do Duto de Alimentação	0,0170
Comprimento do Duto de Sucção	0,1000
Diâmetro do Duto de Sucção	0,0490

Na caixa de filtração imediatamente antes e após o meio filtrante, foi conectado um sensor de pressão para medir a queda de pressão do filtro. Os dados desse sensor eram armazenados pela placa de aquisição de dados durante toda a operação em intervalos de 5s. O suporte da caixa de filtração era móvel e permitia que ela pudesse ser operada na posição vertical durante a filtração, e na posição horizontal para a limpeza como mostra a Figura 3.7).

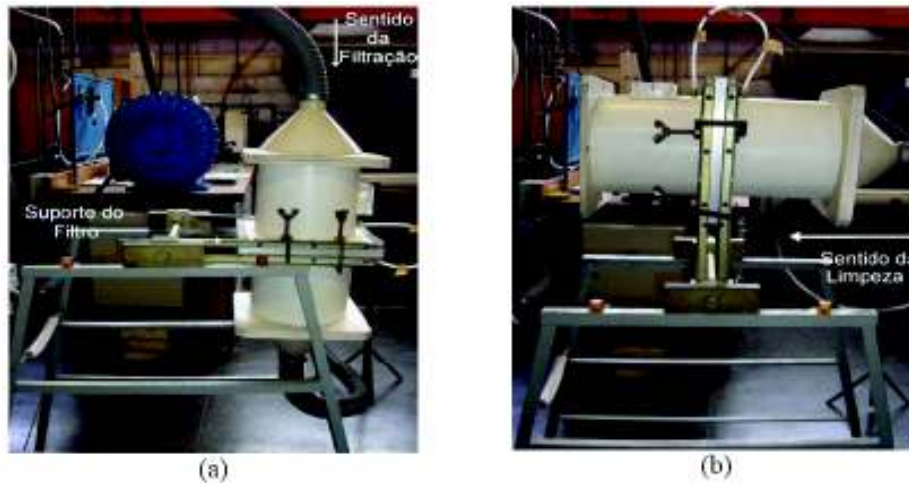


Figura 3.7: (a) Equipamento no Modo de Filtração; (b) Equipamento no Modo de Limpeza

3.3.3 Sistema de Aquisição de Dados

A bancada de ensaios era equipada com um sistema de aquisição de dados que permitia o controle e análise das variáveis estudadas. Esse sistema era constituído por um microcomputador 486 DX2, provido de uma placa de aquisição de dados comercial para computadores compatíveis com o padrão IBM-PC, que permitia a leitura de 16 sinais de sensores externos e controle de dois atuadores analógicos e 24 linhas de entrada-saída digitais (tipo liga-desliga). Os experimentos foram controlados por meio do *software* elaborado em Visual Basic 3.0[®], que juntamente com as rotinas fornecidas pelo fabricante da placa realizava os registros das variáveis de interesse na operação.

Neste trabalho foram registrados os dados de queda de pressão em função do tempo de filtração, e os dados das velocidades do ar durante a filtração e durante a limpeza. As velocidades eram mantidas constantes, em um valor previamente estipulado por meio do programa com o auxílio de um controlador de rotação do soprador. Durante a operação de filtração ocorria um aumento contínuo da perda de carga, que tende a diminuir a vazão de ar. Para manter essa vazão constante, o controlador acelerava a rotação de giro do motor. O acompanhamento deste controle era feito pela placa de aquisição de dados e por uma placa de orifício, calibrada para uso neste trabalho, colocada na linha entre os dois medidores de pressão que se encontravam ligados a micromanômetros digitais. As equações de Calibração da placa de orifício podem ser encontradas em TANABE (2008).

Para os registros das variáveis, a perda de carga era instrumentada por um sensor de pressão e lida pela placa de aquisição de dados, sendo registrada juntamente com o tempo e a velocidade. A placa de orifício foi calibrada na posição de filtração e limpeza através de rotâmetros de alta vazão

3.4 Planejamento Experimental

A operação de filtração envolve diversas variáveis, assim a análise e planejamento dos experimentos são mais confiáveis utilizando técnicas estatísticas para esse fim. A técnica de superfície de resposta, que tem como base o planejamento fatorial dos experimentos, é de fundamental importância neste trabalho, pois permite verificar os efeitos individuais e as interações entre as variáveis, a avaliação dos erros experimentais e de regressão e o equacionamento empírico dos resultados em função das variáveis escolhidas (BOX et al., 1978). O número de variáveis a serem estudadas aliadas à necessidade de obter uma estimativa de parâmetros de uma superfície de segunda ordem e ainda, a redução do esforço experimental, levaram à utilização do Planejamento Composto Central (PCC). O PCC é um planejamento fatorial de primeira ordem, aumentado por pontos adicionais para permitir a estimação dos parâmetros de uma superfície de segunda ordem. Portanto, foi realizado um PCC composto por um planejamento fatorial a dois níveis com três variáveis acrescido de duas réplicas no ponto central e ainda seis experimentos nos pontos axiais α) totalizando 16 experimentos. Nesse planejamento experimental foram realizados experimentos para verificar a influência de três variáveis na formação da tora de filtração, sendo elas:

- X_1 - Velocidade Filtração(cm/s);
- X_2 - Tempo de Filtração (s) e,
- X_3 - número de Ciclos de Filtração (adimensional).

Os níveis das variáveis estudadas foram colocados na forma codificada (adimensionalizada), utilizando a seguinte equação de codificação:

$$X_n = \frac{(X - X_0)}{\frac{X_{+1} - X_{-1}}{2}} \quad (3.1)$$

em que:

X_n é o valor da variável no experimento na forma codificada;

X é o valor real da variável a ser calculado;

X_0 é o valor real da variável no ponto central;

X_{+1} é o valor real da variável no nível superior;

X_{-1} é o valor real da variável no nível inferior.

O valor de $\alpha = 1,287$ foi calculado para que o PCC fosse ortogonal, isto é, um planejamento onde a matriz de variância e covariância são diagonais e os parâmetros estimados não são correlacionados entre si (BOX et al., 1978).

O valor de α , foi calculado através da seguinte equação:

$$\alpha = \left(\frac{Q \cdot G}{4} \right)^{1/4} \quad (3.2)$$

em que:

$$Q = \left[(G + T)^{1/2} - G^{1/2} \right]^2 \quad (3.3)$$

por sua vez, G é o número de pontos fatoriais ($G = 2^k$, se completo) e T é o número de pontos adicionais no PCC; $T = 2^K +$ número de réplicas centrais.

Os valores da velocidade de filtração foram retirados da literatura, haja vista que na industria comumente se trabalha com valores em torno de 10 cm/s , este foi escolhido como ponto médio de velocidade de filtração, e os demais valores foram calculados a partir desse. O tempo de filtração está diretamente ligado à queda de pressão, portanto, foram utilizados tempos que levem a quedas de pressão máxima utilizadas na industria. Já o número de ciclos foi fixado o número mínimo e o restante calculado de acordo com o planejamento. A Tabela 3.3 apresenta a matriz do planejamento com os níveis de cada variável utilizada nesse PCC, e seus respectivos valores.

Tabela 3.3: Matriz do Planejamento Experimental

Experimento	Variáveis Codificadas			Variáveis Descodificadas		
	X_1	X_2	X_3	V_f (cm/s)	t_f (s)	NC
1	+1	+1	+1	14	600	16
2	+1	+1	-1	14	600	2
3	+1	-1	+1	14	300	16
4	+1	-1	-1	14	300	2
5	-1	+1	+1	6	600	16
6	-1	+1	-1	6	600	2
7	-1	-1	+1	6	300	16
8	-1	-1	-1	6	300	2
9	0	0	0	10	450	9
10	0	0	0	10	450	9
11	$-\alpha$	0	0	4,85	450	9
12	$+\alpha$	0	0	15,15	450	9
13	0	$-\alpha$	0	10	260	9
14	0	$+\alpha$	0	10	640	9
15	0	0	$-\alpha$	10	450	0
16	0	0	$+\alpha$	10	450	18

Após a realização do PCC utilizou-se a matriz com os valores fornecidos na Tabela 3.3 para iniciar os ensaios de filtração e encontrar as seguintes respostas: (ε), (L), (M_c) e (M_r).

- porosidade, calculada pela correlação de Ergun 2.19 (ε);
- espessura da torta de filtração, medida pelo MEV (L)
- massa de pó coletada durante a filtração medida diretamente por pesagem da torta (M_c)
- massa removida do meio filtrante durante a limpeza (M_r)

3.4.1 Análise Estatística das Respostas

A análise estatística dos dados foi feita utilizando o programa Statistica 7.0[®] a partir da análise de regressão múltipla, pelo método dos mínimos quadrados, para cada uma das respostas, tendo como parâmetros os termos isolados, de interação e quadráticos dos três fatores estudados. A equação empírica de 2^a ordem proposta para representar cada uma das respostas segue a seguinte forma:

$$Y = \beta_0 + \sum_j \beta_j \cdot X_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} \cdot X_i \cdot X_j + \sum_j \beta_{jj} X_j^2 + e \quad (3.4)$$

Sendo:

Y = resposta estudada;

β_0 = valor médio da resposta;

$i e j$ = parâmetros da equação;

β_j = efeito do nível dos fatores;

β_{ij} = efeito da interação dos níveis;

β_{jj} = efeito quadrático dos níveis;

X_1 = Concentração de sulfato (mg/L);

X_2 = Concentração de carbono (mg/L);

X_3 = Concentração de nitrato (mg/L).

A essa equação foram aplicados os resultados obtidos e feita uma avaliação estatística da estimação dos parâmetros por meio dos valores de t de *Student* para cada um, sendo eliminados aqueles com nível de significância (p) superior a 5%, ou seja, as variáveis relacionadas a estes são consideradas não relevantes quando p superior a 5%. Os parâmetros não significativos foram eliminados, obtendo-se assim, uma equação que representa os efeitos das variáveis na resposta que está sendo analisada e que determina qual das variáveis mais afeta tal resposta. Pode-se, ainda, prever qual a melhor condição para o processo. O valor do R^2 e a comparação entre F calculado e F tabelado foram utilizados para constatação da significância ou não do modelo (FELIPE, 1999).

Com o objetivo de verificar o comportamento da resposta estudada, isto é, se ela apresenta ponto de máximo, de mínimo ou não apresenta nem ponto de máximo e nem de mínimo (ponto de sela) é necessário descobrir o ponto estacionário. Os pontos estacionários são obtidos através da derivada da equação da resposta Y pela variável X_k , isto é:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = \frac{\partial Y}{\partial X_2} = \dots = \frac{\partial Y}{\partial X_k} = 0 \quad (3.5)$$

sendo, $Y = b_0 + x'_b + x'B_x$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [b_0 + x'b + x'Bx] = b + 2Bx = 0 \quad (3.6)$$

sendo b_0 o termo independente;

x'_b são os termos de 1ª. ordem na função de resposta;

$x'B_x$ é a contribuição quadrática.

Então, o ponto estacionário foi dado por: $x_0 = -(1/2)B^{-1}b$, em que B é a matriz (k x k), e a diagonal é composta pelos coeficientes dos termos quadráticos da equação e os termos fora da diagonal são correspondentes aos coeficientes das interações divididos por 2 (ex: a_{12} e a_{21} correspondem ao coeficiente da interação X_1X_2). A matriz b é uma matriz coluna composta pelos coeficientes associados às variáveis isoladas (variáveis lineares).

O ponto estacionário (x_0) pode ser:

- um ponto onde a superfície atinge um máximo;
- um ponto onde a superfície atinge um mínimo, ou
- um ponto nem de máximo, nem de mínimo => Ponto de sela (“saddle point”).

Porém, podem existir problemas relacionados a estes pontos estacionários:

- uma região de máximo e não um ponto de máximo;
- o ponto estacionário pode estar fora da região experimental.

Para determinar a natureza desse ponto estacionário foi necessário fazer uma análise canônica, que considera uma translação da superfície de resposta da origem (X_1, X_2, \dots, X_k) = (0, 0, ..., 0) para o ponto estacionário x_0 (Figura 3.8). Então a função resposta é formulada em termos de novas variáveis, w_1, w_2, \dots, w_k . Então, obtém-se a função de resposta em termos das novas variáveis:

$$Y = y_0 + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + \dots + \lambda_k w_k^2 \quad (3.7)$$

y_0 : é a resposta estimada no ponto estacionário e, 1, 2, ..., k são constantes.

Os sinais dos coeficientes de λ e a grandeza dos mesmos ajudam a determinar a natureza do ponto estacionário. A relação entre os valores de w e x também é importante, pois indicam ao

pesquisador quais são as regiões úteis para exploração. Se $i < 0$, com $\lambda_i = 1, 2, \dots, k$, quando os movimentamos em qualquer direção a partir do ponto estacionário, teremos um decréscimo de Y , isto é, o ponto estacionário x_0 é um ponto de resposta máxima da superfície ajustada. Se $\lambda_i > 0$, o ponto estacionário x_0 é um ponto de mínimo para a superfície ajustada e, se os λ_i 's têm sinais diferentes, o ponto estacionário x_0 não é nem ponto de máximo, nem de mínimo. Para obtenção dos pontos estacionários bem como a análise canônica dos dados para cálculo dos pontos de maximização das respostas foi utilizado um algoritmo implementado no *software* Maple IX Realease 9[®].

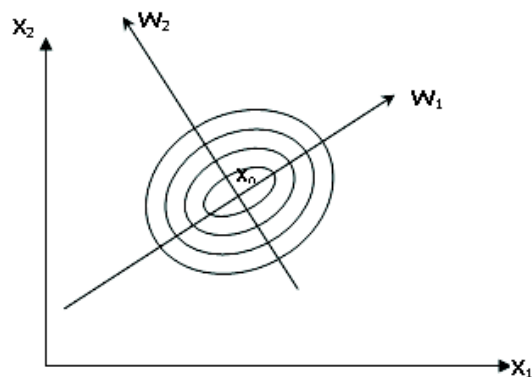


Figura 3.8: Translação da superfície de resposta da origem para o ponto estacionário.

Fonte:BOX et al. (1978)

3.5 Metodologia Experimental

3.5.1 Filtração

Os ensaios de filtração foram realizados com umidade relativa controlada tanto dentro da caixa de desumidificação (caixa de alimentação), quanto a umidade ambiente no laboratório. Essa umidade permaneceu abaixo de 20% durante todo o período de operação. De forma a garantir a faixa de umidade requerida dentro da caixa de alimentação, o ar comprimido fornecido ao venturi (proveniente das linhas do laboratório) passava através de duas colunas recheadas de sílica gel (colunas desumidificadoras). Quanto ao ambiente, os ensaios foram realizados em períodos de baixa umidade, salve algumas excessões em que se utilizou um desumidificador de ambiente.

A rotação do soprador foi controlada por um transdutor que garantiu uma velocidade de filtração constante durante os experimentos tanto de filtração quanto de limpeza. Os principais componentes desse sistema de filtração serão apresentados na sequência.

Para a realização dos ensaios de filtração foram estabelecidas as velocidades de filtração, o tempo de filtração e o número de ciclos para cada experimento de acordo com o teste realizado. No início de cada operação o prato de alimentação foi calibrado de modo a mesma alimentação de sólidos a todos os ensaios. O sólido utilizado nos experimentos era higroscópico, e a ausência de umidade deste material era garantida através da permanência deste em estufa. Esse material era depositado no cone da caixa de desumidificação. Essa então era fechada e o ar comprimido era ligado para alimentar o interior da caixa e adequar os níveis de umidade ao requerido.

Pesava-se meio filtrante limpo em uma balança Marte modelo AM5500, com 4 casas de precisão. E então, o filtro era colocado na gaveta metálica e encaixado na caixa de filtração, e preso por meio de garras. Quando a umidade no interior da caixa de desumidificação era menor do que 20%, o soprador era ligado. Depois de todo esse procedimento, ligava-se simultaneamente a rotação do prato de alimentação e o sistema de aquisição de dados. O ar sujo era então succionado para o interior da caixa de filtração e passava através do filtro posicionado na horizontal e perpendicular ao escoamento do gás como mostra a Figura 3.7 (a). Assim, as partículas se depositavam entre as fibras e também na superfície do meio filtrante, formando a torta de filtração. O ar filtrado que saía do filtro tinha a vazão medida por uma placa de orifício acoplada ao manômetro digital, esse ar limpo passava pelo soprador (sucção), que era descartado na atmosfera. Terminado o tempo de filtração, desligava-se simultaneamente a rotação do prato de alimentação e o sistema de aquisição de dados, o filtro era limpo e se repetia a operação de filtração até o número de ciclos pré-determinado.

3.5.2 Limpeza

Atingido o tempo estabelecido de filtração era necessário remover a torta formada, para então se completar um ciclo de filtração, neste trabalho a remoção da torta foi realizada por meio da técnica de limpeza por fluxo de ar reverso com a velocidade de limpeza de 15 *cm/s*, durante um período de um minuto, por meio da inversão do sentido do ar. A escolha dessa velocidade

foi baseada no estudo de TOGNETTI (2007), em que a autora estudou a influência da velocidade de limpeza no comportamento de formação e remoção de tortas utilizando como meios filtrantes feltros de acrílico, poliéster e polipropileno. A autora estudou o comportamento do feltro de poliéster para as velocidades de 5, 10 e 15 cm/s , e constatou que as maiores velocidades de limpeza apresentaram a melhor regeneração do tecido, tendo como consequência menor perda de carga residual. Terminada a filtração, removia-se a parte superior da caixa de filtração e, essa era então colocada na posição horizontal (filtro na vertical) como mostra a Figura 3.7 (b). Por meio do *software*, alterava-se o programa para o modo limpeza e se estabelecia a velocidade desejada. A massa de sólidos removida nessa operação era coletada e pesada na Balança Mate modelo AM5500, assim como a massa do filtro após a limpeza, para se obter a massa retida após a limpeza e a massa total filtrada. Esse procedimento foi repetido para cada ciclo.

3.5.3 Obtenção da Porosidade

A porosidade da torta de filtração como dito anteriormente é uma variável muito importante para o projeto de filtro de mangas, neste trabalho a porosidade foi determinada pelo método indireto, ou seja estimada através da correlação de Ergun (Equação 2.19) e também pelo método direto desenvolvido por AGUIAR (1995).

Método Direto

O método de determinação experimental da porosidade da torta consiste na preparação de uma camada de torta, para, posteriormente, ser examinada em um microscópico eletrônico de Varredura (MEV), o qual fornecia dados quantitativos quanto à estrutura da torta que eram analisados no *software* Image Pro Plus 7.0[®]. A preparação da análise se dá por meio do procedimento desenvolvido por AGUIAR (1995), em que o tecido após a última filtração foi submetido às etapas de pré-endurecimento, embutimento, seccionamento, esmerilhamento e polimento. Essas etapas estão apresentadas a seguir. As amostras analisadas no MEV foram retiradas, sempre que possível, das mesmas regiões do filtro, cada amostra consistia em quadrados de aproximadamente 1 cm^2 de área.

Pré-endurecimento da amostra

Imediatamente após a finalização dos ensaios de filtração, as amostras eram submetidas ao pré-endurecimento com adesivo instantâneo. Esse procedimento foi realizado no aparato apresentado na Figura 3.9. Esse consistia em duas tampas de ferro galvanizado semelhante a caixa de filtração. A parte interna dessas tampas foi revestida com uma borracha macia, com a finalidade de vedar a saída de ar por essa parte.



Figura 3.9: Equipamento para o pré-endurecimento da amostra

A vazão do ar comprimido que arrastava o vapor do adesivo instantâneo (LOCTITE-416) para a torta de filtração foi medida por um rotômetro e o valor da vazão foi mantido constante em $0,5 \text{ l/min}$. O método consistia em passar vapor de adesivo instantâneo (LOCTITE-416), arrastado pelo fluxo de ar, através do meio filtrante. A velocidade de arraste do gás foi mantida em aproximadamente $0,1 \text{ cm/s}$, para evitar um possível rearranjo das partículas impregnadas no tecido durante o pré-endurecimento. O tecido ficou nesse equipamento por aproximadamente 24 horas, ou até que a impregnação do adesivo ao meio filtrante fosse totalmente garantida.

Embutimento do Tecido

Após a etapa de pré-endurecimento, o tecido foi transportado para uma vasilha tipo pirex contendo uma esponja de $0,5 \text{ mm}$ de espessura e de mesma área do tecido. A parte interna ficou

completamente encharcada com uma resina embutidora (PMS-10) (Figura 3.10). Após colocar a torta de filtração nesse recipiente, a resina foi adicionada até o completo encharcamento do tecido.



Figura 3.10: Vista do equipamento de embutimento

A resina utilizada PMS-10 era anaeróbica com viscosidade aproximada, 7 a 10 cp, cor clara, tempo de vida de 1 ano e não continha solvente. Essa resina foi fornecida pela LOCTITE do Brasil. Essa resina foi “curada” em estufa sem recirculação de ar a 60 °C por aproximadamente 24 horas, resultando em um tecido duro como mostra a Figura 3.11.



Figura 3.11: Tecido endurecido após embutimento

Seccionamento

O tecido já endurecido foi seccionado em partes menores com formato quadrado de aproximadamente 1 cm^2 de área, o seccionamento se deu com uma serra tipo correia. A seguir essas

partes foram embutidas em moldes cilíndricos de PVC, utilizando outra resina, RESAPOL-208, deixando-a “curar” por aproximadamente 72 horas a temperatura ambiente. A amostra ficou envolta com esta resina, o que a proporcionou uma resistência mecânica à amostra para as próximas etapas.

Esmerilamento

Essa etapa visou o desgaste da resina de embutimento da amostra. Para tal as amostras foram lixadas, a úmido, cuidadosamente em lixas de carbetto de silício na sequência de 320, 600, 1200 e 2000 *mesh*, mantendo-se a operação em torno de 10 minutos em cada lixa, dependendo da amostra. As amostras eram lavadas com álcool antes da troca de lixas.

Polimento

Após o esmerilamento as amostras foram polidas, utilizando-se uma politriz em baixa rotação. O tecido utilizado no polimento foi um veludo macio, que era impregnado com uma suspensão de alumina de 1 μm . Essa operação variou de acordo com as amostras, mas o tempo de giro foi de aproximadamente 30 minutos, ou até que todos os riscos deixados pelas lixas fossem retirados da amostra. Esta etapa é muito importante para a captura de imagens de alta qualidade no MEV.

As amostra polidas (livres de qualquer ranhura), foram submetidas a um recobrimento metálico com tinta a ouro (Figura 3.12), utilizando um equipamento específico do Laboratório de microscopia do Instituto de Química da USP São Carlos.



Figura 3.12: Amostras polidas e recobertas com tinta a ouro

Método Indireto

A porosidade da torta de filtração foi determinada utilizando-se os dados de queda de pressão (ΔP) em função do tempo de filtração (t) e a Equação de Ergun Modificada 2.19. Optou-se por utilizar a equação modificada, visto que o termo viscoso era desprezível para a faixa de velocidade estudada.

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

3.6 Determinação da Permeabilidade dos Meios Filtrantes

A permeabilidade do meio filtrante foi determinada tanto para os tecidos virgens, como para os tecidos impregnados com material particulado. Esse parâmetro foi realizado utilizando dois manômetros digitais de precisão. Cada tecido foi colocado separadamente no módulo de filtração estando completamente limpo ou para os tecidos impregnados, após a remoção da torta de filtração. Sendo submetidos a velocidades crescentes, no sentido da filtração. Os valores de queda de pressão na saída e na entrada do elemento filtrante foi registrado e posteriormente convertido para Pascal, unidade conveniente de pressão. A permeabilidade foi então calculada utilizando-se a Equação ??, e os coeficientes angular e linear obtidos a partir da construção de gráficos de queda de pressão em função da velocidade.

3.7 Fluidodinâmica Computacional

Apesar da essência empírica desse trabalho, é possível a aplicação, de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para a obtenção de algumas particularidades do escoamento do gás no interior da caixa de filtração utilizada no presente estudo. A aplicação das técnicas de CFD permite, em tese, a obtenção dos perfis de pressão e velocidade ao longo da caixa de filtração, a distribuição da velocidade do fluido antes e após o meio poroso (torta e/ou filtro), a visualização de rotas preferenciais de escoamento do fluido, bem como as respectivas regiões de recirculação. Vislumbrando tais possibilidades, a fim de que a Fluidodinâmica Computacional possa complementar

os estudos empíricos até então realizados, esta seção apresenta o procedimento de confecção da malha computacional da unidade experimental, assim como as principais informações acerca da metodologia numérico-fenomenológica empregada para cumprir os propósitos aqui consignados. Vale mencionar que os *softwares* empregados foram o GAMBIT[®] e o FLUENT[®].

3.7.1 Confecção da Malha Computacional e Simulação

A malha computacional que representa a caixa de filtração desse trabalho foi confeccionada no ambiente do software GAMBITR (Fluent Inc., 2008) para, posteriormente, ser transferida adequadamente ao software FLUENTR para a execução das simulações fluidodinâmicas. A malha computacional era constituída de 144.255 células tridimensionais e híbridas. Maiores detalhes acerca da malha computacional mencionada anteriormente, bem como as dimensões geométricas empregadas são apresentados na Figura 3.12.

A malha computacional que representa a unidade experimental deste trabalho foi confeccionada no ambiente do *software* GAMBIT[®] (Fluent Inc., 2008) para posteriormente ser transferida adequadamente ao *software* FLUENT[®] para a execução das simulações fluidodinâmicas. A malha computacional era constituída de 144.255 células tridimensionais e híbridas. Maiores detalhes acerca da malha computacional mencionada anteriormente, bem como as dimensões geométricas empregadas são apresentados na Figura 3.13.

A partir da malha computacional construída no ambiente GAMBIT[®], conforme detalhes apresentados anteriormente, foram utilizadas inicialmente algumas condições nesta etapa do trabalho que são apresentadas na Tabela 3.4 (necessárias para a realização das simulações fluidodinâmica no âmbito do *software* FLUENT[®]

3.7.2 Simulação

Antes de dar início à simulação, é necessário determinar as condições de contorno apropriadas. Na entrada da caixa de filtração, definida como “*velocity inlet*”, eram fornecidos ao *software* os valores das componentes da velocidade do fluido. Foi considerado neste trabalho que a descarga da saída se dava à pressão atmosférica local. Logo em relação a “*pressure gauge*” foram fornecidos

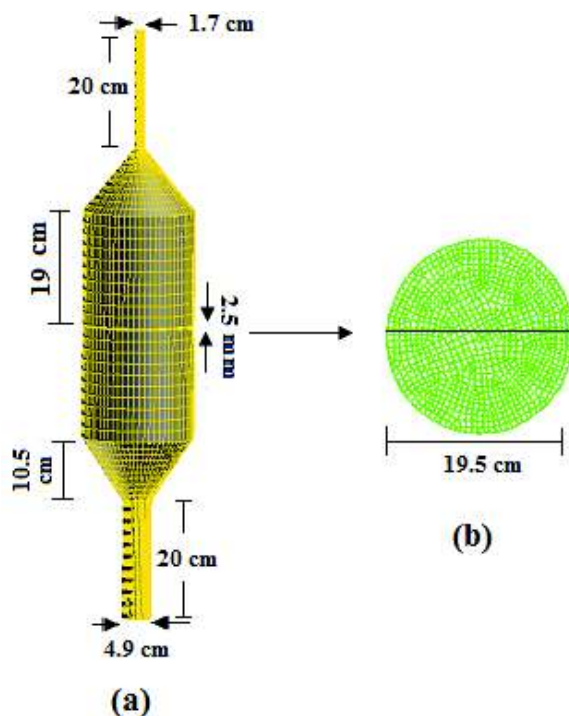


Figura 3.13: Detalhamento da Malha construída no Ambiente GAMBIT[®] (a) sistema de filtração (b) meio filtrante

Tabela 3.4: Condições Iniciais para Simulação no Fluent[®]

Modelo de Turbulência	RSM (Reynolds Stress Model)
Regime de Escoamento	Turbulento e Estado Estacionário
Esquema de Interpolação da Pressão	PRESTO!
Esquema de Interpolação para as demais variáveis	UPWIND 2 ^a Ordem
Algoritmo de Acoplamento Velocidade-Pressão	SIMPLE
Condição de Contorno na Entrada do Sistema	velocidade média do gás no duto de alimentação
Condição de Contorno na Saída do Sistema	Pressão atmosférica local
Permeabilidade do Meio Filtrante (virgem)	$5,8710^{-10} m^2$
Porosidade do Meio Filtrante (virgem)	0,82
Fluido	ar (25°C)

valores nulos ao resolvidor durante as simulações. Também foram informadas ao *software* em relação ao meio poroso, a espessura, a permeabilidade, a porosidade e a direção de escoamento do filtrado.

A complexidade do escoamento no interior da caixa de filtração levou à adoção de um modelo de turbulência, RSM (Reynolds Stress Model).

Em relação à interpolação da pressão, foi aplicado o esquema PRESTO!, enquanto, para o

acoplamento do binômio pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLE. No que tange às demais variáveis fluidodinâmicas, optou-se pela escolha de esquemas de interpolação do tipo UPWIND de segunda ordem.

A execução de qualquer simulação em pacotes comerciais de CFD requer além de tempo uma combinação de diversos fatores, tais como o tipo de malha, o número de células, o grau de refinamento da malha, os níveis de turbulências, a tolerância dos resíduos, os fatores de relaxação, o número de fases envolvidas, a geometria do escoamento, os esquemas de interpolação, os métodos de acoplamento, os modelos de turbulência, os modelos multifásicos etc.

Por meio da fluidodinâmica computacional, pode-se obter as principais variáveis relevantes na fluidodinâmica de filtros-de-tecido. Neste trabalho, foi analisada a queda de pressão, que foi obtida pela diferença entre os valores médios de pressão na entrada do meio filtrante pelos valores médios de pressão logo após a sua saída. Também foi possível, por meio de ferramentas gráficas, a visualização dos perfis de pressão e de velocidades.

3.7.3 Levantamento das Curvas de Velocidade

Para o estudo do comportamento fluidodinâmico do gás dentro da caixa de filtração, assim como, no interior do meio filtrante, foram traçadas curvas em diferentes pontos para se estudar os perfis de velocidade do gás ao longo do plano XZ em relação ao diâmetro da caixa de filtração (parte cilíndrica). A Figura 3.14 mostra a posição de cada curva em que foi levantado o perfil de velocidade.

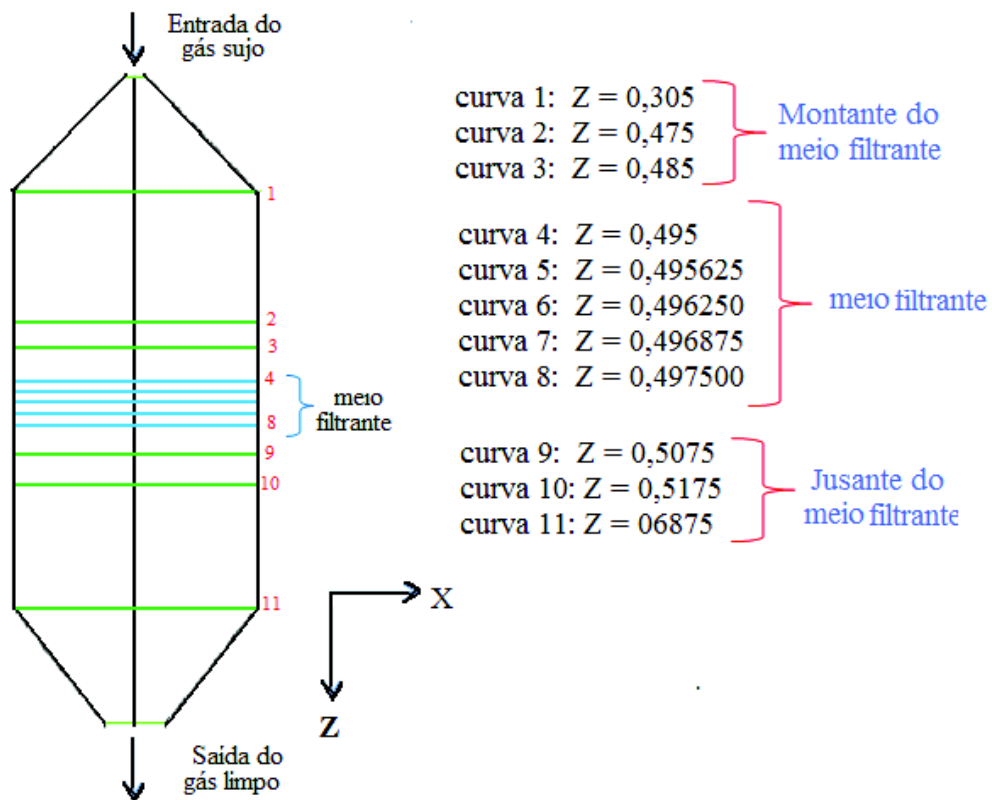


Figura 3.14: Posição das curvas do perfil de velocidade

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho foi desenvolvido em três etapas: a primeira etapa constou de um Planejamento Composto Central (PCC), visando encontrar uma condição ótima de filtração; a segunda foi a etapa experimental em que se estudou a estrutura da torta de filtração bem como as mudanças ocorridas no meio filtrante após a regeneração do tecido, frente a diferentes condições de filtração. Na terceira e última etapa estudou-se a fluidodinâmica do gás no interior da caixa de filtração, para diferentes velocidades de filtração, números de ciclos e diferentes meios filtrante, por meio da aplicação de técnicas de Fluidodinâmica Computacional.

4.1 Planejamento de Experimentos

Com o intuito de obter as equações de regressão para as quatro respostas estudadas foi realizado o tratamento estatístico dos resultados listados na Tabela 4.1 que relacionam os três fatores com seus respectivos níveis codificados. A relação entre o nível codificado de cada fator e o seu valor absoluto está definida na Tabela 3.3. Os 16 experimentos listados na Tabela 4.1 correspondem a um planejamento do tipo composto central e as respostas de interesse analisadas: espessura da torta (L), massa coletada (M_c), massa removida (M_r) e porosidade (ε).

Tabela 4.1: Matriz do PCC com as respostas empregada no estudo

Variáveis Estudadas			Respostas			
X_1 (V_f)	X_2 (t_f)	X_3 (NC)	$L(mm)$	$Mc(g)$	$M_r(g)$	ε
+1	+1	+1	2,67	7,83	7,62	0,54
+1	+1	-1	2,85	10,20	11,24	0,55
+1	-1	+1	1,36	5,85	5,75	0,42
+1	-1	-1	1,22	4,81	4,45	0,46
-1	+1	+1	1,75	6,98	2,10	0,50
-1	+1	-1	1,69	5,64	5,34	0,62
-1	-1	+1	1,05	4,91	5,06	0,48
-1	-1	-1	1,15	4,65	4,35	0,51
0	0	0	2,46	8,96	8,87	0,54
0	0	0	2,71	9,32	9,37	0,53
-1,287	0	0	2,14	8,18	8,27	0,59
+1,287	0	0	2,94	11,36	11,26	0,50
0	-1,287	0	1,12	4,56	4,54	0,50
0	+1,287	0	2,63	10,13	10,19	0,53
0	0	-1,287	2,29	8,75	0,00	0,48
0	0	+1,287	1,91	7,40	3,15	0,44

Com os dados da Tabela 4.1 foi possível por meio da da técnica de múltipla-regressão definir a interdependência entre estas variáveis e as quatro respostas analisadas. Analisando os coeficientes de regressão e ignorando os fatores não-significativos obtiveram-se os modelos com as variáveis codificadas para a espessura (Eq.4.1), massa coletada (Eq 4.2), massa removida (Eq 4.3) e porosidade (Eq 4.4).

$$L(mm) = 0.026 + 0.0031X_1 + 0.0054X_2 - 0.0048X_2^2 - 0.0034X_3^2 + 0.0021X_1X_2 \quad (4.1)$$

com ($R^2 = 0,97$)

$$M_C(g) = 9.56 + 0.94X_1 + 1.55X_2 - 1.69X_2^2 - 1.25X_3^2 \quad (4.2)$$

com ($R^2 = 0,84$)

$$M_r(g) = 8.18 + 1.41X_1 + 1.17X_1^2 + 1.23X_2 - 3.77X_3^2 + 1.33X_1X_2 - 1.11X_2X_3 \quad (4.3)$$

com ($R^2 = 0,90$)

$$\varepsilon = 0.53 - 0.02X_1 + 0.03X_2 - 0.02X_3 - 0,03X_3^2 \quad (4.4)$$

com ($R^2 = 0,76$)

Para as respostas estudadas e representadas pelas quatro equações, verificou-se que essas eram afetadas pelas três variáveis X_1 , X_2 e X_3 de forma isolada e/ou combinada e X_1 apresentou efeito predominante em todos os casos. Com base nessas equações e considerando a faixa experimental estudada, foi possível identificar as condições que as maximizam. A otimização foi feita usando a técnica de análise canônica. As condições ótimas em sua forma codificada podem ser vistas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Condições ótimas para as variáveis em estudo

Variável	Velocidade de Filtração (X_1)	Tempo de Filtração (X_2)	Número de Ciclos (X_3)
Espessura (E)	1.287	0.845	0
Massa removida (M_r)	1.287	1.287	-0.189
Massa coletada (M_C)	1.287	0.456	0
Porosidade (ϵ)	1.287	0.845	0

Considerando que as quatro respostas estavam inter-relacionadas, a otimização da operação de filtração deveria levar em conta o efeito dos níveis dessas variáveis em cada resposta, assim, se fazia necessário escolher uma condição ou região experimental que atenderia às quatro respostas. Nesse sentido, esse planejamento teve como pretensão determinar uma condição que atendesse de forma equilibrada à maximização da espessura, das massas removidas e coletadas e uma porosidade intermediária. O valor intermediário para a porosidade era desejável para garantir uma condição de equilíbrio entre a perda de carga e a eficiência de coleta, haja vista que essa última ao contrário da primeira aumentava com a diminuição da porosidade. A condição de otimização da espessura Eq. 4.1 foi a que atendeu de forma mais abrangente às quatro respostas.

Considerando os resultados da otimização citada, optou-se por plotar as superfícies de respostas fixando a variável velocidade superficial de filtração (X_1) em seu nível axial positivo, ou seja, $\alpha = 1.287$ o que levava aos maiores resultados para E , M_r e M_c . As superfícies de respostas apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.4 mostram que para todas as respostas estudadas o número de ciclos (X_3) também apresentou um efeito similar sob essas, sendo nesse caso, o valor do nível central o responsável pela maximização de todas as respostas analisadas.

A variável tempo de filtração (X_2) influenciou tanto de forma isolada quanto quadrática nas respostas espessura e massa coletada, o que justifica juntamente com o número de ciclos (X_3) a presença de um ponto de máximo característico. Por outro lado, a variável tempo de filtração (X_2)

não apresentou efeito quadrático sob as respostas massa removida (M_r) e porosidade (ε), o que justifica a inexistência de um ponto de máximo característico gerando, portanto, uma curva do tipo sela.

As superfícies de resposta ilustradas nas Figuras 4.1 a 4.4 conforme mencionado, foram obtidas para o valor da velocidade de filtração fixo em seu nível máximo visando otimizar as quatro respostas citadas, uma vez que maiores velocidades arrastam maior quantidade de partículas com maiores diâmetros. Assim a quantidade de material particulado que chega ao filtro nessas velocidades são superiores às demais.

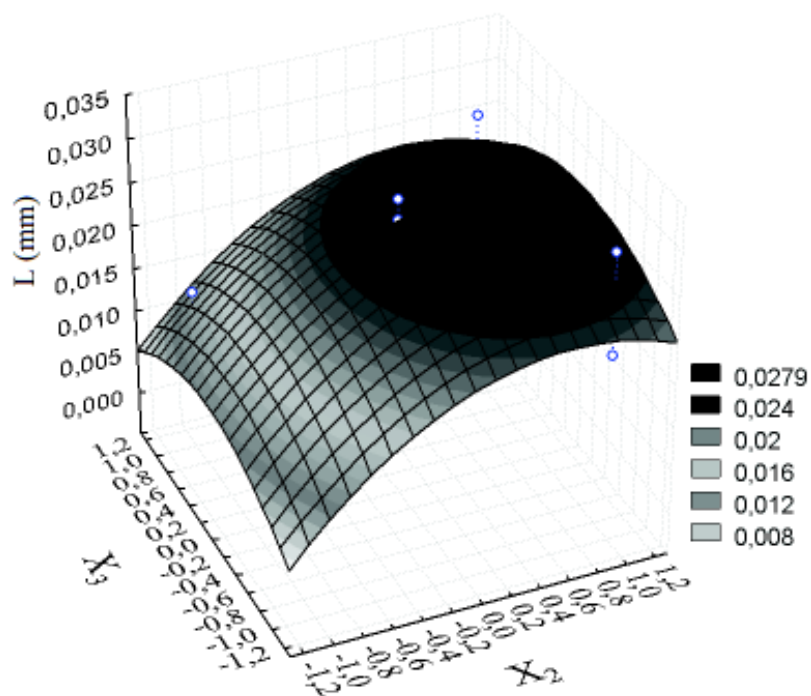
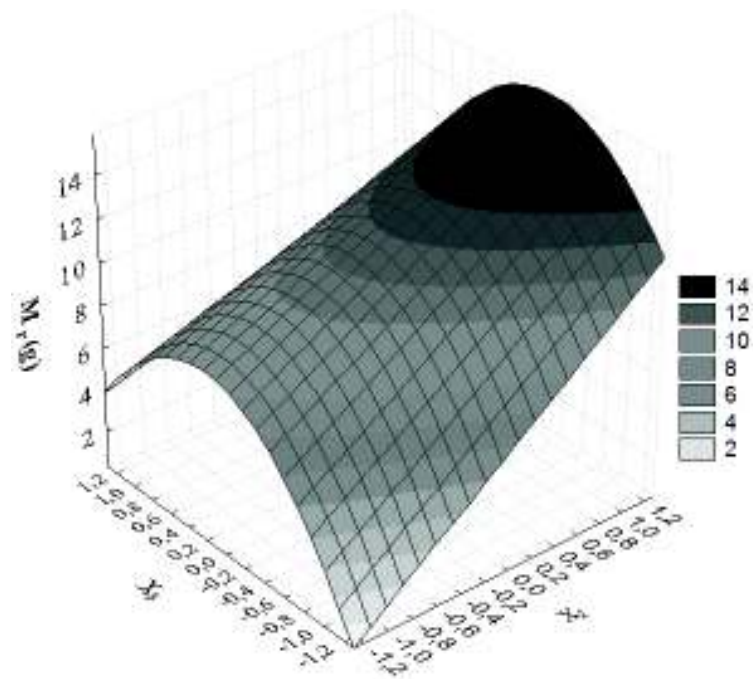
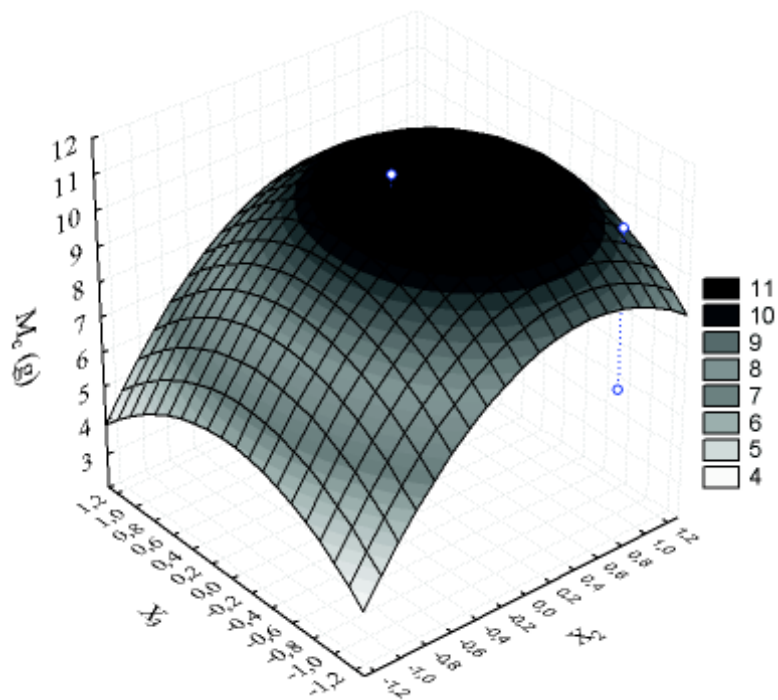


Figura 4.1: Superfície de resposta para espessura (E) para $X_1 = 1,287$

Figura 4.2: Superfície de resposta para massa removida (M_r) para $X_1 = 1,287$ Figura 4.3: Superfície de resposta para massa coletada (M_c) para $X_1 = 1,287$

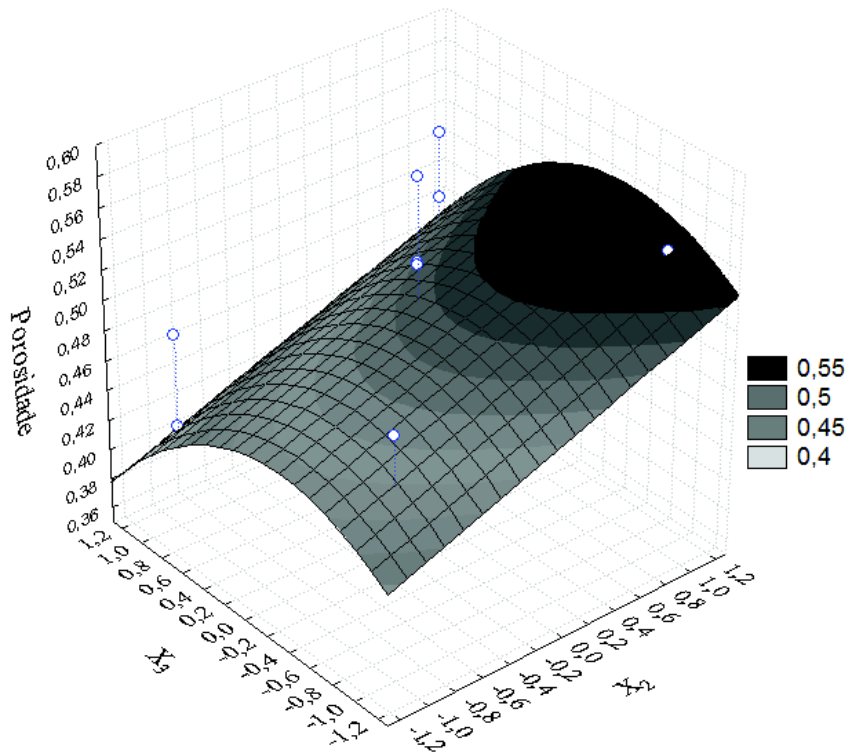


Figura 4.4: Superfície de resposta para porosidade (ϵ) para $X_1 = 1,287$

4.1.1 Testes na Região Ótima

De acordo com as condições ótimas apresentadas na Tabela 4.2 das repostas estudadas, pode-se determinar uma região ótima de investigação. Visto que para todas as repostas a coordenada do ponto de máximo para X_1 foi o maior valor estudado, ou seja $\alpha = 1,287$ que a partir da Equação 3.1 é de $15,15\text{cm/s}$. Essa Tabela também mostra uma concordância em relação ao número de ciclos, que ficou próximo ao valor codificado de $X_3 = 0$, que nos fornece um valor decodificado de 10 ciclos. O tempo de filtração foi a única variável que não apresentou um ponto de maximização e sim uma região de maximização. Assim com os valores de X_2 na Tabela 4.2 e a Equação 3.1 pode-se encontrar os tempos de filtração de 518, 576 e 640s para maximização das repostas.

A Tabela 4.3 mostra os valores encontrados para cada resposta nos tempos da região de otimização, visto que os valores de velocidade de filtração e número de ciclos foram fixados em $15,15\text{cm/s}$ e 10 respectivamente.

Tabela 4.3: Resultados referentes à validação da condição ótima

Resposta	10 ciclos			30 ciclos		
	Tempo de Filtração (s)			Tempo de Filtração (s)		
	518	576	640	518	576	640
$L(mm)10^2$	4,9	7,2	7,4	6,7	7,1	7,4
$M_c(g)$	13,08	15,04	17,82	10,80	11,79	12,878
$M_r(g)$	11,118	12,784	15,147	8,868	10,184	10,797
ϵ	0,63	0,67	0,67	0,69	0,65	0,58

Pela Tabela 4.3 verifica-se que realmente nessa região de otimização encontra-se valores máximos para a massa coletada durante a operação de filtração e para massa removida do meio filtrante na limpeza, com uma porosidade média, visto que a porosidade do meio filtrante é de 0,82 e a menor porosidade encontrada no PCC foi de 0,42, pode-se assumir que porosidades em torno de 0,65, podem ser consideradas médias.

Entretanto, na indústria 10 ciclos de filtração é um número baixo, visto que a parte mais onerosa de um filtro de mangas já instalado é o material de construção das mangas. Dessa forma, se fez necessário determinar essas variáveis respostas para um número maior de ciclos. Dando continuidade aos experimentos de filtração, conservando a velocidade e os tempos ditos ótimos, pode-se perceber que nessa região de otimização as respostas passaram por um ponto de máximo nos 10 ciclos de filtração. Porém, este valor diminuiu para um número maior de ciclos como pode ser visto na Tabela 4.3.

De acordo com GEANKOPLIS (1998) dados de filtração não possuem reprodutibilidade considerável, visto que a concentração de partículas que chegam ao meio filtrante pode modificar a forma de deposição das partículas. A concentração de partículas alimentadas nesse experimento foi constante, entretanto da torta de filtração não é uma variável controlável, e apresenta grande influência nas respostas estudadas.

Outro problema enfrentado na realização do planejamento de experimentos foi a não colmatação do meio filtrante. Os experimentos foram feitos partindo de um tecido virgem, e para cada ciclo de filtração as condições desse tecido eram alteradas até se atingir o ponto de colmatação do tecido. Assim os experimentos realizados anteriormente a esse ponto de colmatação, não podem ser comparados, visto que existe mais uma variável no planejamento, o meio filtrante.

Dessa forma pode-se concluir que a velocidade de filtração bem como o tempo e o número de ciclos influenciam na estrutura da torta de filtração, entretanto não foi possível encontrar uma região ótima para este planejamento.

Como o tempo de filtração e a velocidade superficial foram as variáveis que mais influenciaram nas respostas, foi realizado um estudo da influência da velocidade de filtração (Seção 4.2) e do número de ciclos (Seção 4.3) na regeneração do meio filtrante.

4.2 Influência da Velocidade de Filtração na Regeneração do Meio Filtrante

Os resultados apresentados nesta seção são referentes a 10 ciclos de filtração com tempo fixo de 450 segundos. Esse tempo foi adotado de forma a se alcançar valores de queda de pressão próximos ao utilizado na indústria para a menor velocidade estudada. A limpeza dos tecidos foi realizada pelo tempo de 60 s com velocidade constante de 15 cm/s. As velocidades de filtração utilizadas foram de 5, 10 e 15 cm/s, se fixou o tempo e não a perda de carga máxima para também estudar a influência da velocidade de filtração na espessura das tortas formadas.

A velocidade de filtração é uma importante variável que influencia tanto na formação quanto na remoção da torta de filtração. Segundo estudos desenvolvidos por TANABE (2008) para maiores velocidades de filtração, as partículas penetram mais profundamente no tecido, dificultando a remoção dessas partículas durante a limpeza, o que conseqüentemente ocasiona maior perda de carga para a filtração seguinte, denominada perda de carga residual, assim como, modifica a estrutura do meio filtrante. A influência da velocidade de filtração na perda de carga está apresentada na Figura 4.5, em que pode-se ver a queda de pressão em função do tempo de filtração de cada ciclo.

A correlação clássica de Ergun (Equação 2.19), bem como as demais correlações apresentadas neste trabalho, mostram que a queda de pressão é diretamente proporcional à velocidade de filtração. Na Figura 4.5, pôde-se constatar, que para um valor de massa alimentada constante, as três velocidades apresentaram para um mesmo tempo de filtração, diferentes valores de queda de pressão. Os valores de queda de pressão atingidos para as maiores velocidades estão em concordância

com as correlações da literatura.

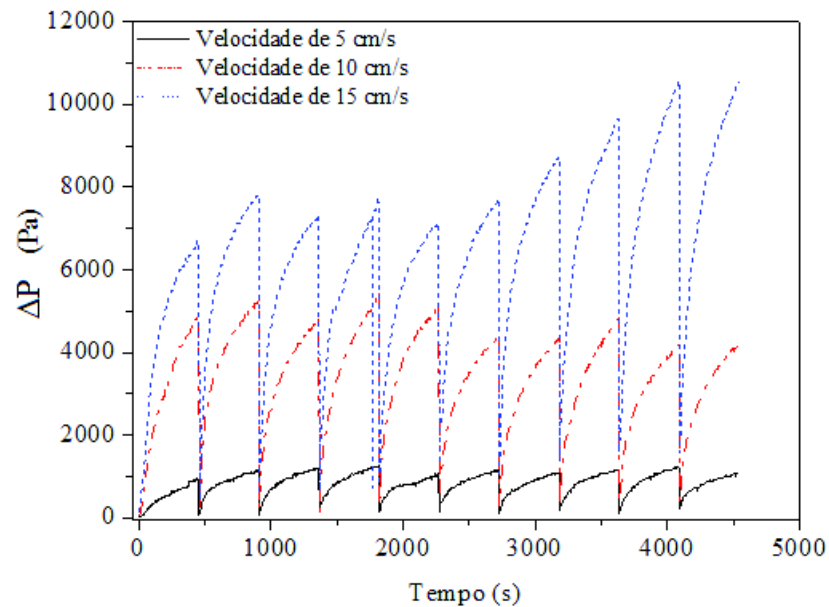


Figura 4.5: Queda de pressão total para três as velocidades em função do tempo de filtração

Ainda na Figura 4.5 pode-se verificar que, para o número de ciclos estudados os valores de queda de pressão para as velocidades de 5 e 10 cm/s tenderam a estabilização. Não obstante, para a velocidade de 15 cm/s essa tendência não foi observada. Podendo-se concluir que saturação do tecido nas velocidades de 5 e 10 cm/s foi atingida dentro dos dez ciclos de filtração.

Valores estes que também foram encontrados por RODRIGUES (2006). No que tange às maiores velocidades, o número de ciclos não foi suficiente para essa saturação, ou seja, o meio continua apresentando variações em suas características. Para um melhor entendimento da influência da velocidade na operação de filtração, foram traçadas curvas de pressão em função da carga mássica (Figura 4.6 a - j).

Outro ponto importante verificado na Figura 4.6, é a formação de curvas mais convexas no início da filtração para as maiores velocidades, Indicando a ocorrência de um maior período de filtração interna para essas velocidades. Segundo TANABE (2008) e RODRIGUES (2006), as maiores velocidades apresentam um incremento na profundidade de deposição de partículas no interior no meio filtrante, bem como um maior acúmulo de partículas. Provavelmente está é a razão do aumento na resistência do meio filtrante à passagem do ar, configurando assim, maiores valores de queda de pressão.

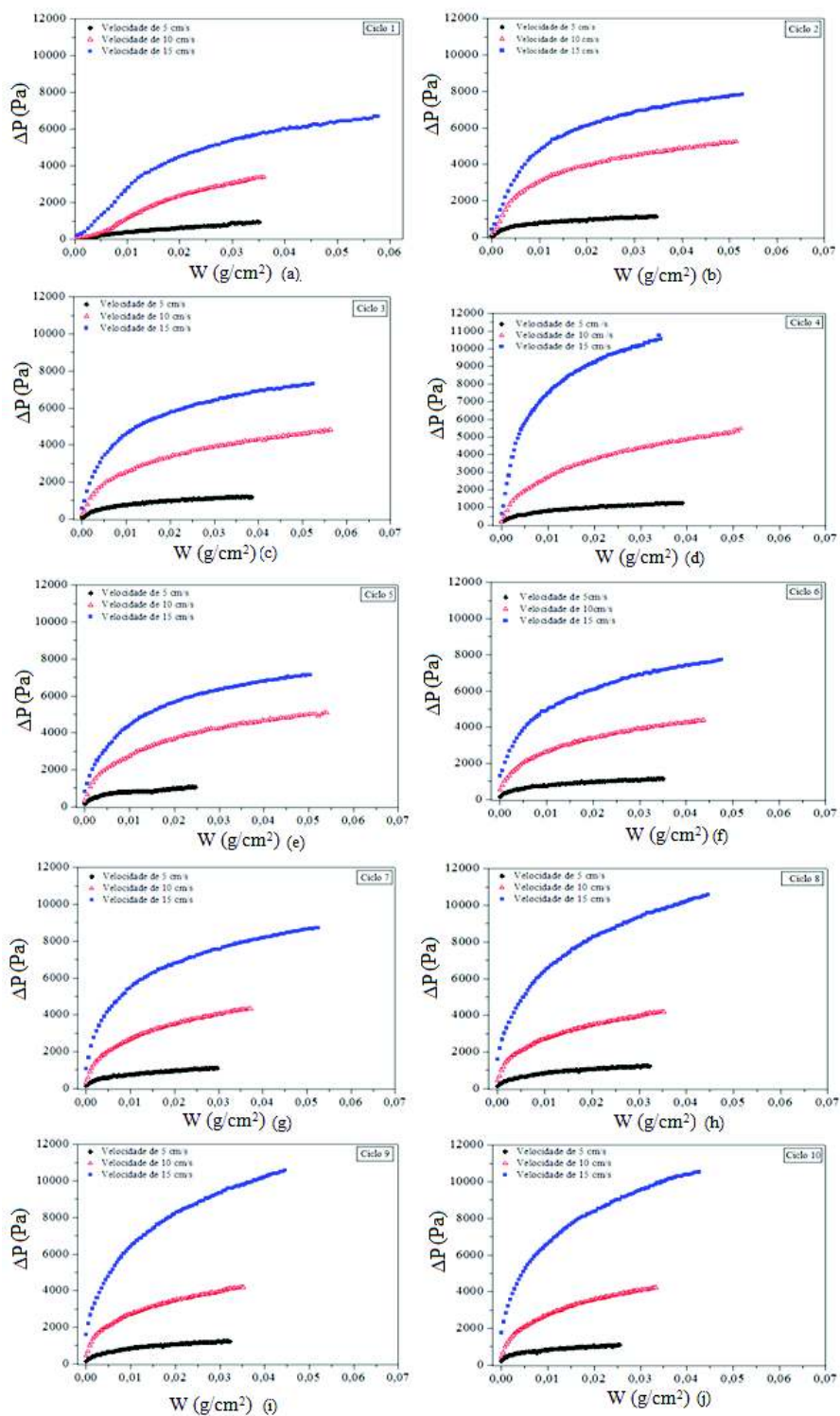


Figura 4.6: Perda de carga em função da carga mássica do ciclo 1 (a) ao ciclo 10 (j).

A influência da velocidade de filtração nas quantidades de massa total filtrada, massa removida durante a limpeza e massa retida após a limpeza pode ser constatada na Figura 4.7.

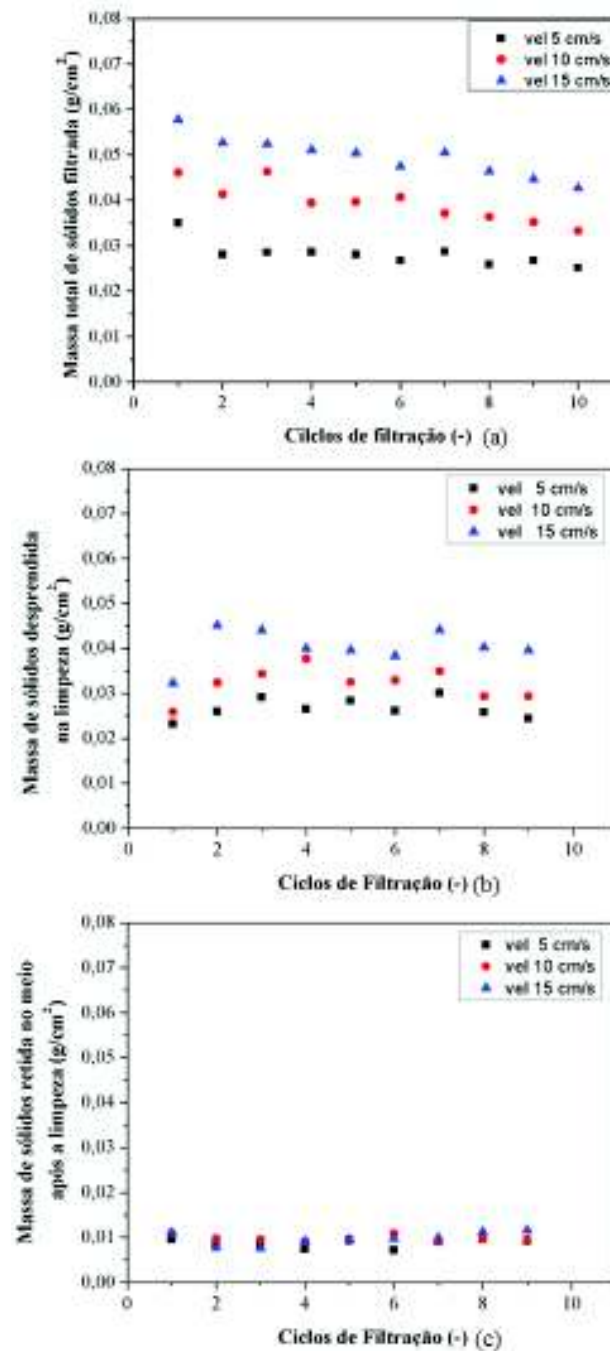


Figura 4.7: (a) Massa total de sólidos filtrada, (b) Massa de sólidos desprendida na limpeza e (c) Massa de sólidos retida no meio após a limpeza

As curvas apresentadas na Figura 4.7 (a) confirmaram que a massa total filtrada pelo tecido virgem foi maior quando comparada à massa total filtrada nos ciclos subsequentes. Novamente a filtração interna, pode ser utilizada para explicar o ocorrido. Visto que a filtração acontece primeiramente no interior do tecido, preenchendo os poros do meio filtrante com partículas, essa etapa corre até a chamada saturação do tecido. Após a etapa de saturação do meio inicia-se a formação de uma camada de partículas na superfície, com a continuidade da operação ocorre a deposição de novas partículas sobre essa camada formando a torta de filtração. A saturação do meio filtrante também é a responsável pela coleta de menor quantidade de massa nos ciclos subsequentes, uma vez que as operações sucessivas de limpeza e filtração levam a maior acomodação das partículas no interior do tecido. Com menor tempo de filtração interna, a coleta das partículas se dá cada vez mais na superfície do meio filtrante, atingindo mais rapidamente maiores valores que queda de pressão.

Dados da literatura afirmam que para maior velocidade superficial de filtração ocorre maior penetrabilidade de partículas, o que dificulta a remoção da torta durante a limpeza. Este fenômeno pode ser melhor visualizado nas Figura 4.7 (b) e (c).

A Figura 4.7 (b) mostra que a massa removida pela limpeza para o primeiro ciclo é menor que as demais, pois as partículas adentram mais profundamente no tecido durante a filtração linear e isso dificultou sua remoção. A massa removida aumenta nos ciclos subsequentes, com algumas variações explicadas pelo fenômeno de *patchy cleaning*, ou limpeza de blocos, no qual parte da torta é removida completamente, exceto por uma fina camada de pó, e outras partes da torta permanecem intactas. Ou seja, quando se remove mais torta na limpeza, conseqüentemente se captura mais pó na filtração seguinte, com uma torta mais espessa, se descola mais pó na próxima limpeza. O Fenômeno de *patchy cleaning* foi estudado por TIENI (2005), em que a autora concluiu que para tortas com espessuras maiores, ou seja, maior carga mássica ocorria maior área de desprendimento de torta.

Pela Figura 4.7 (c) foi possível constatar que a massa retida no tecido aumentou com velocidade somente a partir do ciclo 7. A flutuação da massa retida com a velocidade de filtração nos primeiro ciclos, provavelmente ocorreu devido à influência do meio filtrante, visto que o tecido ainda não se encontra completamente saturado. A partir do ciclo 8, devido ao fenômeno da penetrabilidade de partículas, que dificultou a remoção das mesmas, para a velocidade de 15 *cm/s*,

esse valor aumentou e provavelmente continuaria aumentando para um número maior de ciclos, não obstante, para as velocidades de 5 e 10 cm/s o valor da massa retida após limpeza permaneceu constante. Indicando que esse tecido estava completamente saturado para essas velocidades.

A Figura 4.7 (c) apresenta a massa retida no tecido após a limpeza, pode se notar que a massa remanescente aumenta com os ciclos de filtração, segundo TANABE (2008), a quantidade de partículas remanescentes no feltro de poliéster é superior a outros tecidos devido a maior abertura entre as fibras do tecido que proporcionou um maior período de filtração interna e maior deposição das partículas. Assim, com a limpeza, ocorre um rearranjo das partículas em relação à fibra do tecido, permitindo maior impregnação para cada filtração subsequente, até que o tecido se encontre saturado e esse valor tenda a um equilíbrio.

Os efeitos da velocidade de filtração sobre a penetração das partículas no tecido foram estudados por MARTINS (2001). A autora verificou que para velocidades de filtração de 10 cm/s correu maior retenção de partículas no meio filtrante, assim como maior profundidade de penetração e maior perda de carga residual quando comparado com as velocidades de 5 cm/s . Esses efeitos também foram observados neste trabalho. A maior perda de carga residual ocorreu para as maiores velocidades de filtração. Na Figura 4.7 (c) pode-se observar que a partir do ciclo 7, ocorreu maior retenção de massa para a maior velocidade estudada. Os dados da Figura 4.7 foram confirmados nas fotografias do tecido após 10 filtrações e cinco limpezas (Figura 4.8).

A Figura 4.8 mostra que no interior do tecido, para a velocidade de filtração de 15 cm/s , existe uma carga remanescente maior que as demais, esse fato provavelmente ocorreu pela maior penetração das partículas no tecido dificultando a remoção das mesmas na limpeza. Para a velocidade de 5 cm/s pode se observar uma pequena quantidade de partículas, visto que para velocidades menores a filtração ocorreu mais superficialmente facilitando a remoção dessas partículas durante a limpeza.

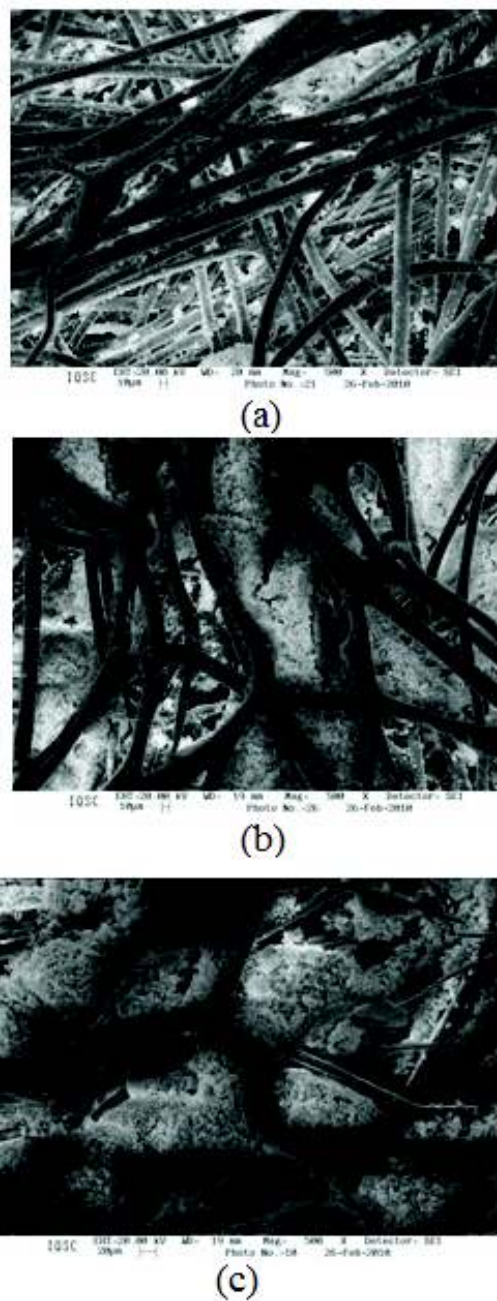


Figura 4.8: Partículas remanescente da limpeza do ciclo 10 para velocidades (a) 5 cm/s , (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s

Após a limpeza do filtro, não ocorreu a regeneração total do meio filtrante, isso foi observado pela perda de carga residual, esse valor aumentou com o número de ciclos tendendo a um valor limite, como pôde ser observado nas curvas de velocidade de 5 e 10 cm/s da Figura 4.6. Esse período é denominado período de condicionamento e pode durar dezenas ou centenas de ciclos,

em alguns casos extremos a saturação do tecido não é atingida, ou seja não se estabelece um equilíbrio, e a queda de pressão residual continua aumentando. Como pode ser visto na Figura 4.9, o número de ciclos estudados não foram suficientes para atingir a colmatação do tecido para a velocidade de 15 cm/s . Sendo necessário um maior número de ciclos para essa velocidade, que será apresentado na Seção 4.3.

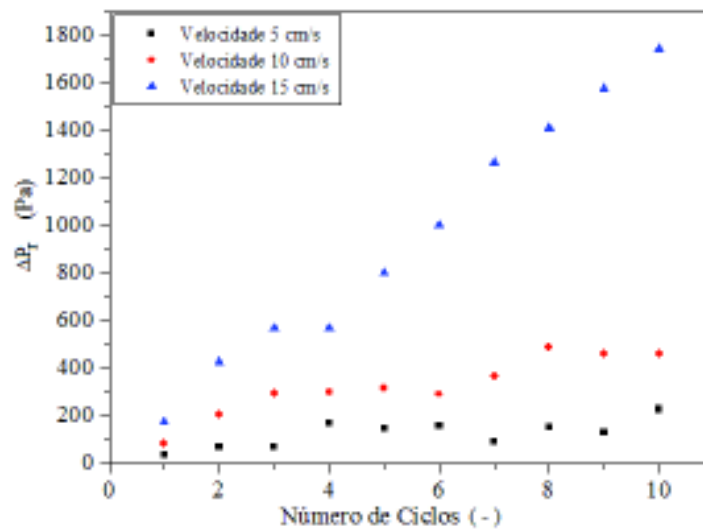


Figura 4.9: Queda de pressão residual para as velocidades de filtração utilizada

A porosidade das tortas de filtração foi obtida tanto pelo método direto como pela correlação de Ergun, Equação 2.19. Os valores das porosidades encontrados diretamente foram de 0,68, 0,57 e 0,49 respectivamente, para as velocidades de 5, 10 e 15 cm/s . As micrografias do corte longitudinal da torta de filtração mais o meio filtrante utilizado nesse cálculo podem ser vistos nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12. As três figuras são referentes às tortas de filtração para o décimo ciclo.

Nas Figuras 4.10, 4.11 e 4.12, pode ser vista a disposição das partículas que formam a torta de filtração em cada velocidade e a penetração das partículas no meio filtrante. Ao observar as partículas no interior do meio filtrante das três figuras pode-se constatar que a deposição das partículas no interior do tecido não é homogênea, MARTINS (2001) encontrou resultados semelhantes em seus estudos, esse autor também concluiu que para maiores velocidades, a profundidade de deposição das partículas aumentava. O meio filtrante utilizados nestes experimentos apresentava uma espessura de $2,5 \text{ mm}$. A Figura 4.12, para a velocidade de 15 cm/s , foram encontradas partículas a uma profundidade de $2,0 \text{ mm}$; para a velocidade de 10 cm/s (Figura 4.11) essa profundidade foi

aproximadamente $1,0\text{ mm}$. Para a velocidade de 5 cm/s (Figura 4.10) a profundidade de penetração das partículas foi menor que $1,0\text{ mm}$, com maior concentração de partículas na interface torta tecido.

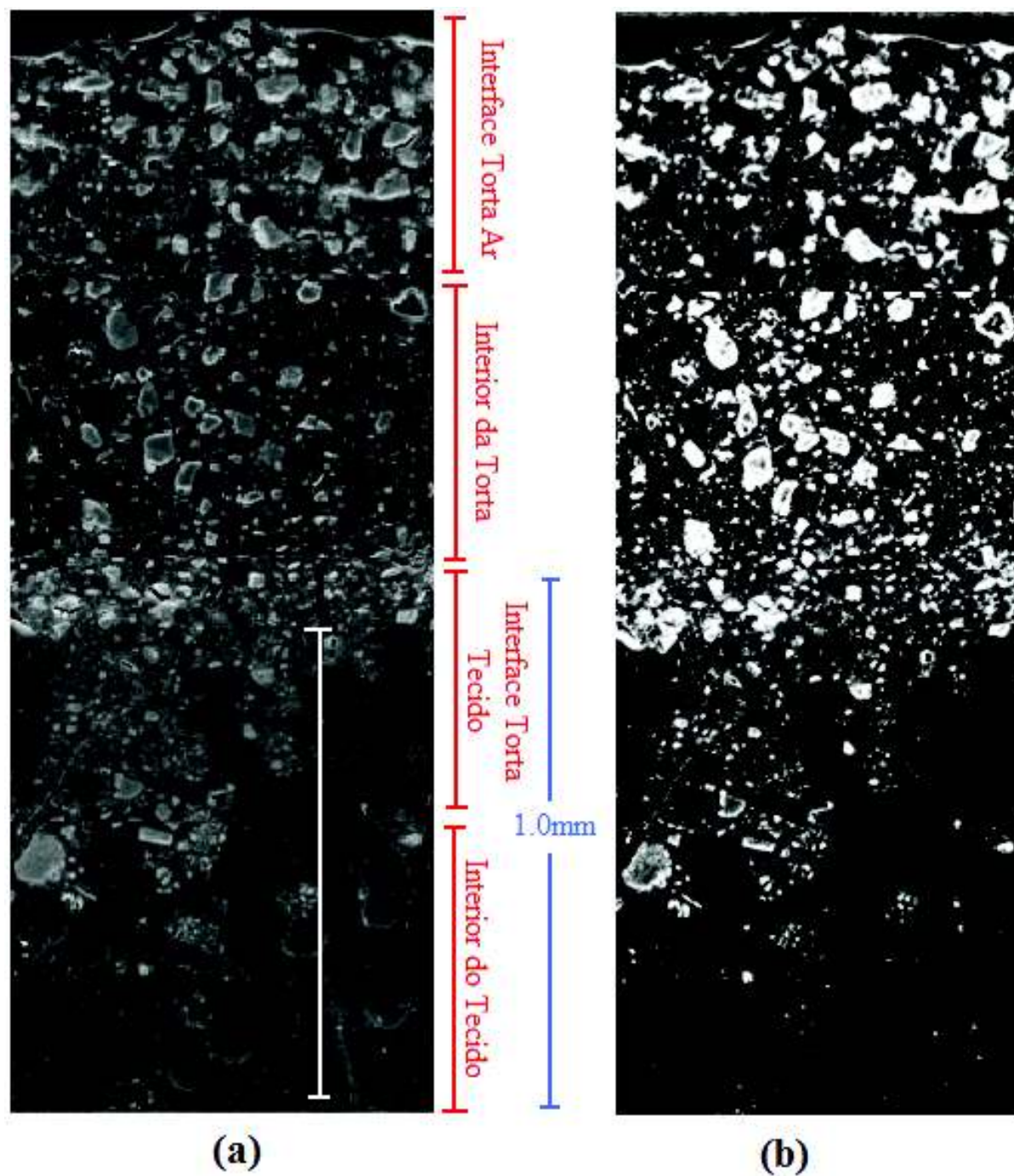


Figura 4.10: Micrografia do corte longitudinal de tortas de filtração com aumento de 2000 vezes (a) amostra sem tratamento (b) amostra binarizada (velocidade de 5 cm/s e 10 ciclos de filtração)

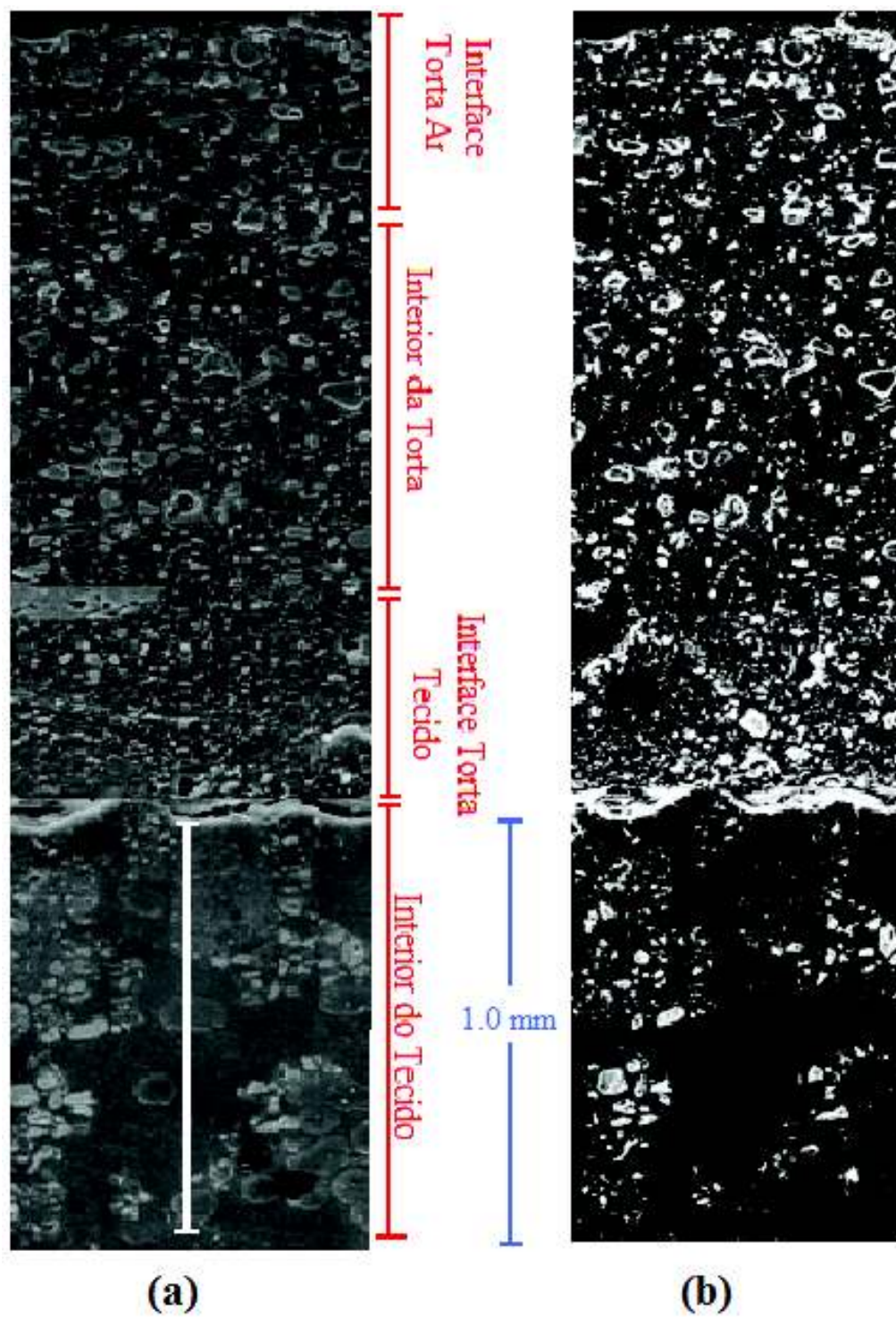


Figura 4.11: Micrografia do corte longitudinal de tortas de filtração com aumento de 2000 vezes (a) amostra sem tratamento (b) amostra binarizada (velocidade de 10 cm/s e 10 ciclos de filtração)

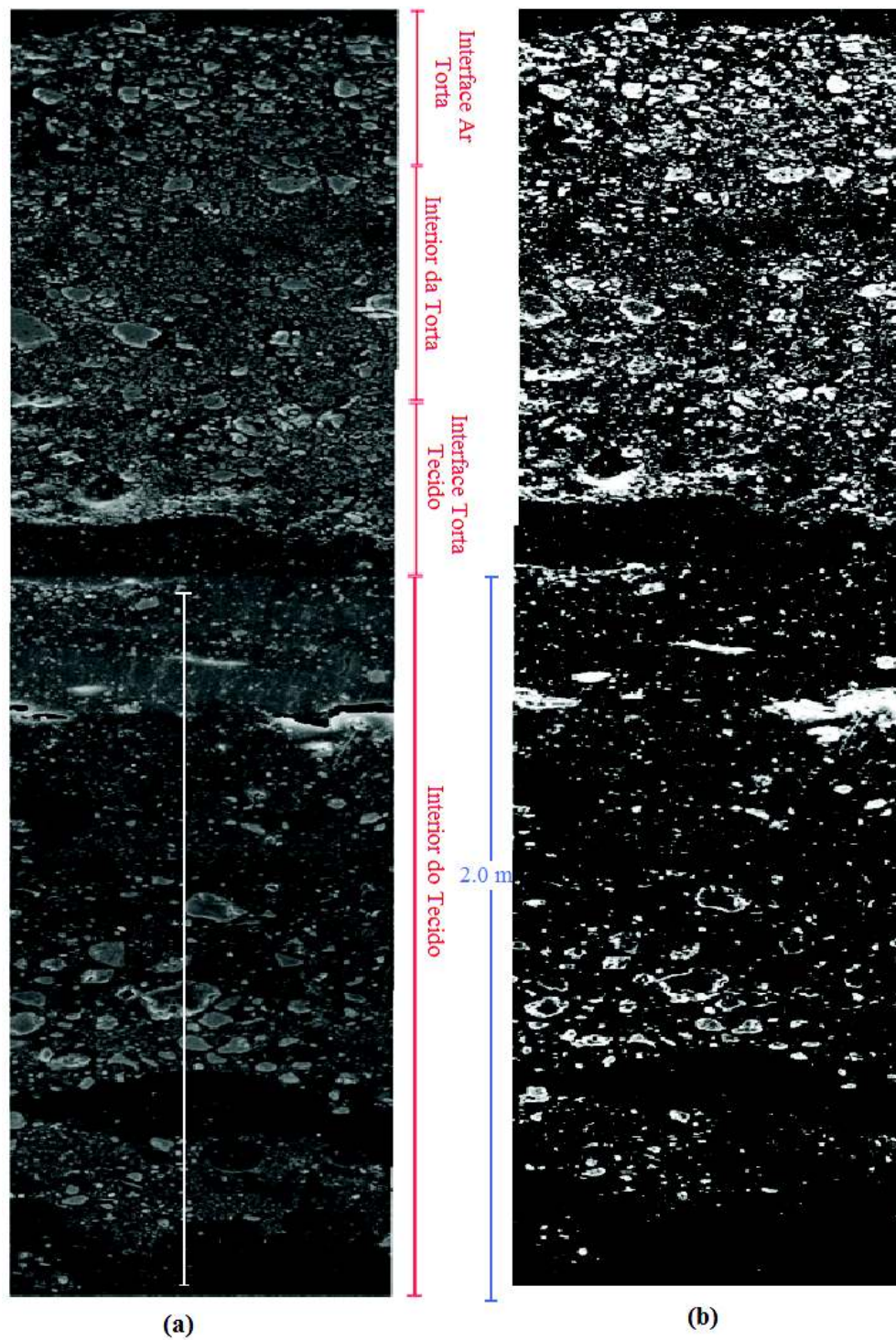


Figura 4.12: Micrografia do corte longitudinal de tortas de filtração com aumento de 2000 vezes (a) amostra sem tratamento (b) amostra binarizada (velocidade de 15 cm/s)

Na tabela 4.4 são apresentados os valores de porosidade médias das tortas de filtração medidas pelo método direto e indireto (Equação 2.19, para o décimo ciclo de filtração para as velocidades de 5, 10 e 15 cm/s e tempo fixo em 450 s).

Tabela 4.4: Valores da porosidade de tortas de filtração de gases obtidos pelo método direto e indireto para o décimo ciclo de filtração

velocidade (cm/s)	Porosidade (%)	
	Método Direto	Método Indireto
5	68	61
10	57	50
15	49	40

4.3 Influência do Número de Ciclos na Regeneração do Meio Filtrante

Pela seção anterior pode-se concluir que o número de ciclos estudados não foi suficiente para descrever o comportamento do meio filtrante para a velocidade de filtração de 15 cm/s . Também pôde-se constatar que o comportamento do meio filtrante foi semelhante para as velocidades de 5 e 10 cm/s . Dessa forma visando avaliar a influência dos ciclos de filtração na regeneração dos tecido, a filtração foi realizada com velocidade constante de 15 cm/s e 5 cm/s . A velocidade de limpeza utilizada foi de 15 cm/s durante 60 s . Foi fixado um tempo de 400 segundos para o primeiro ciclo de cada uma das velocidades, a queda de pressão atingida no primeiro ciclo, foi então fixada como o valor máximo para os demais ciclos de filtração. Portanto a queda de pressão máxima para a velocidade de 5 cm/s foi 2300 Pa e de 9000 Pa para a velocidade de 15 cm/s .

A Figura 4.13 apresenta a evolução da queda de pressão para o feltro de poliéster em função do tempo de filtração, durante 100, para as velocidades de 5 e 15 cm/s .

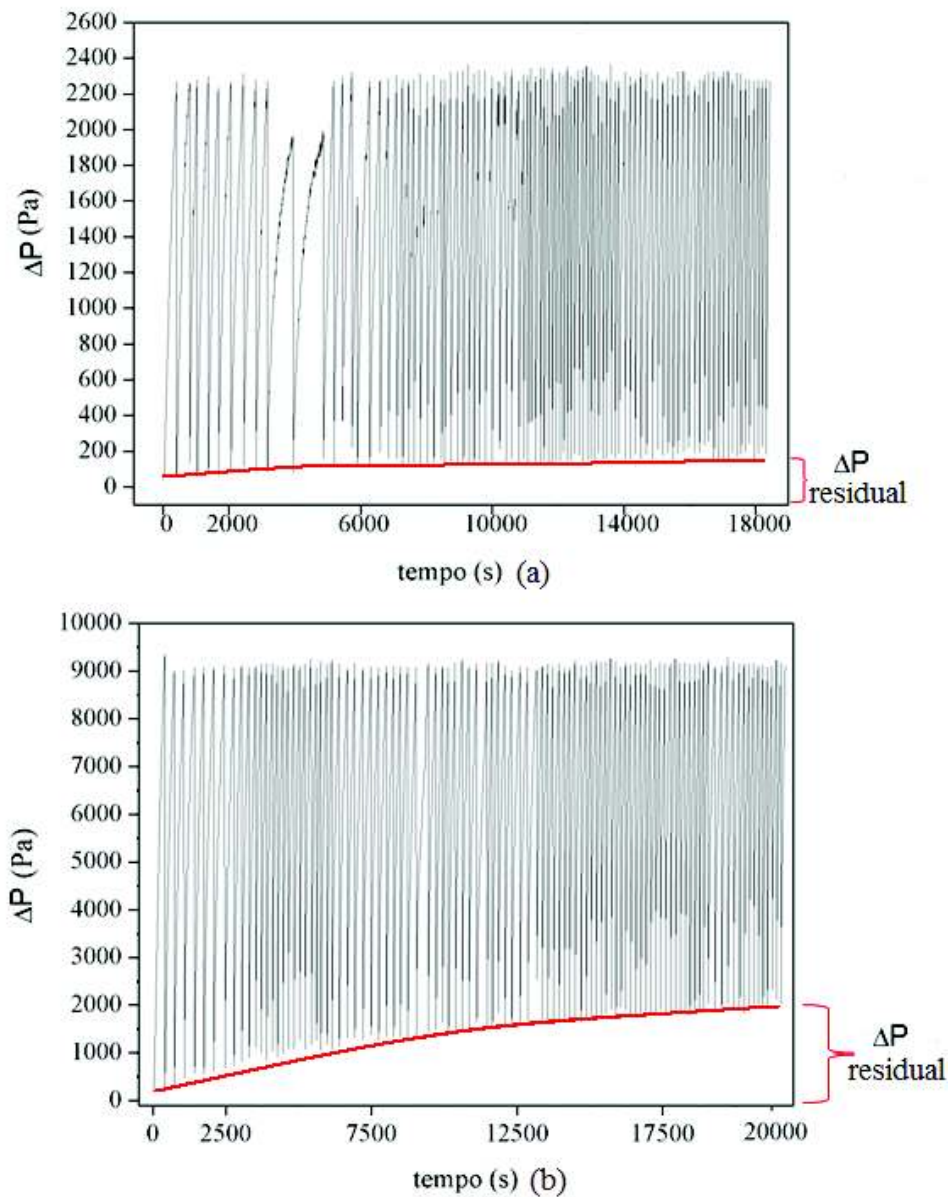


Figura 4.13: Queda de pressão em função do tempo de filtração

A Figura 4.13 mostra que o incremento da queda de pressão residual é mais acentuado para a velocidade de 15 cm/s como mostra a Figura 4.13 (b) quando comparado ao incremento apresentado para a velocidade de 5 cm/s . Confirmando o resultado encontrado na Seção 4.2, a estabilização dos ciclos de filtração aconteceu para os primeiros ciclos para a velocidade de 5 cm/s [(Figura 4.13 (a))]. Para a velocidade de 15 cm/s [Figura 4.13 (b)], a massa acumulada durante a operação de filtração e limpeza foi de, aproximadamente, $3,5 \text{ g/cm}^2$ tendendo a cerca de $2,7 \text{ g/cm}^2$, quando,

aproximadamente metade, dos ciclos havia sido realizada. Apesar da preocupação em se fixar o mesmo tempo de filtração para o primeiro ciclo, visando a alimentar a mesma massa de material particulado no sistema, os tempos dos ciclos subsequentes foram menores para a velocidade de 5 cm/s , o que provavelmente ocorreu pelo fato da formação de tortas a baixas velocidades acontecer superficialmente, diminuindo o tempo de filtração interna e consequentemente atingindo mais rapidamente a perda de carga máxima. Durante esses experimentos também se constatou uma tendência dos ciclos de filtração se tornarem cada vez menores, fato esse que ocorreu devido ao aumento da perda de carga inicial de cada ciclo (queda de pressão residual) como pode ser visto na Figura 4.14.

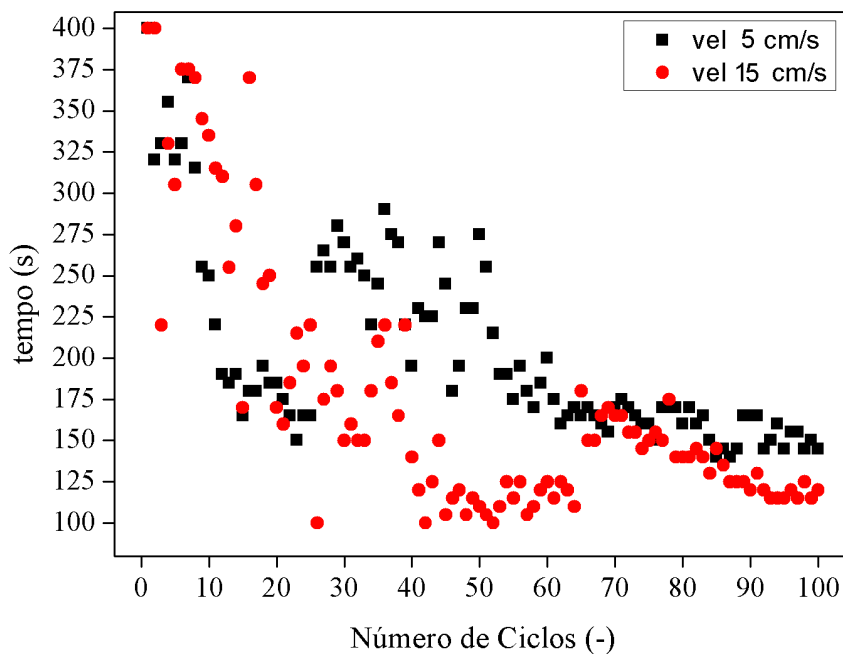


Figura 4.14: Tempo de filtração em função do número de ciclos

Na Figura 4.14 constatou-se que o decréscimo do tempo de filtração em cada ciclo foi mais acentuado para a velocidade de 15 cm/s , porém a partir do septuagésimo ciclo a diferença para as duas velocidades foram minimizadas.

Para melhor compreensão do comportamento das curvas de filtração apresentadas na Figura 4.13, foram construídas curvas de massa removida durante a limpeza, massa retida após a limpeza e queda de pressão residual em função do número de ciclos para as duas velocidades estudadas. A massa de sólidos removida na limpeza por unidade de área em função do número de ciclos está

apresentada na Figura 4.15. Verifica-se a partir dessa Figura que para a velocidade de 5 cm/s a estabilização do meio aconteceu logo após o décimo ciclo. Para a curva de 15 cm/s essa tendência só foi confirmada após o 70º ciclo.

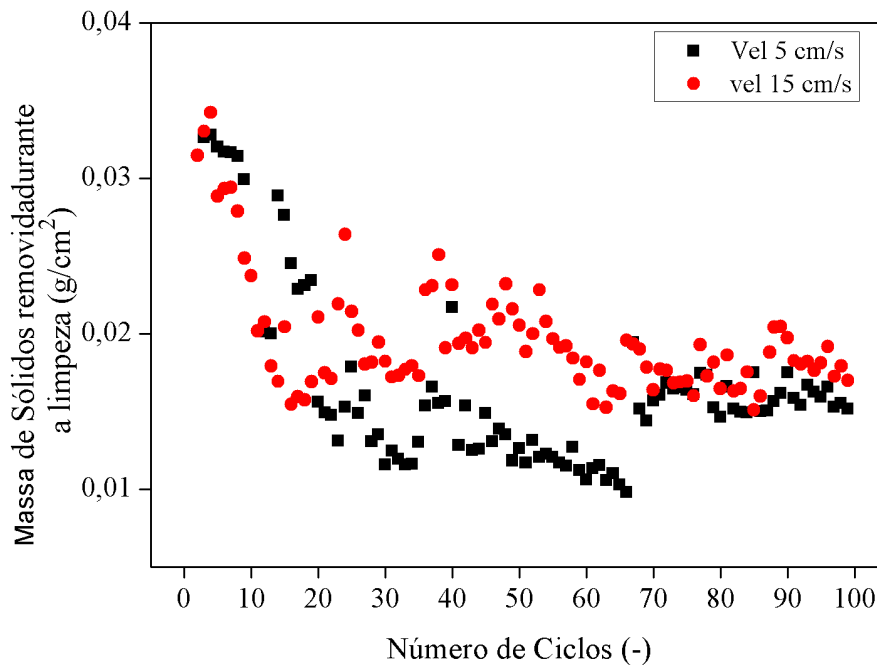


Figura 4.15: Massa removida na limpeza em função do número de ciclos para as velocidades de 5 e 15 cm/s

Apesar da maior massa coletada na filtração para a velocidade de 15 cm/s ela não liberou maior quantidade de massa durante a operação de limpeza. Esse fenômeno pode ser explicado pela maior filtração interna apresentada para as maiores velocidades, o que dificulta a remoção das partículas do interior do meio, haja vista que para as menores velocidades a formação da torta aconteceu mais rapidamente (filtração superficial), foi mais fácil remover as partículas da torta de filtração formada para as baixas velocidades. Ainda de acordo com essa Figura, considerando que a partir do 70º ciclo para as duas velocidades estudadas ocorreu a colmatação do tecido. A massa removida a partir desse ponto foi praticamente igual, ou seja a velocidade de filtração não mais influenciou na massa removida.

Também foram traçadas curvas de massa de sólidos retida no meio filtrante após a limpeza em função do número de ciclos (Figura 4.16)

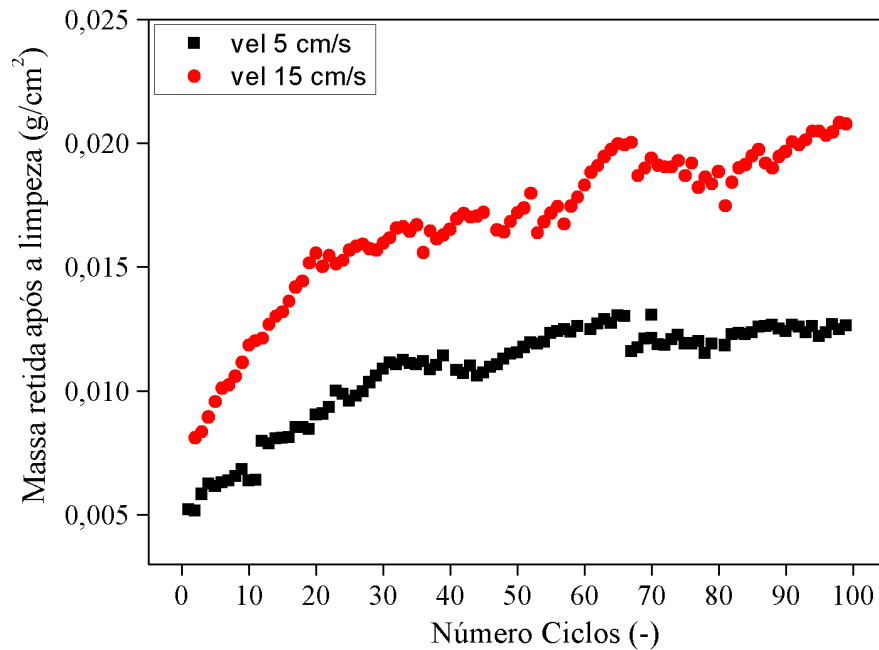


Figura 4.16: Massa retida no meio filtrante após a limpeza em função do número de ciclos para as velocidades estudadas

A queda de pressão residual apresentou uma variação em função do número de ciclos (Figura 4.17). Como esperado que a velocidade que apresentou maior massa retida (15 cm/s), também apresentasse a maior perda de carga. Visto que as partículas remanescentes da limpeza obstruem os poros do tecido e tendem a aumentar a resistência do meio ao fluxo de ar.

Na Figura 4.17 verifica-se que o comportamento da massa retida acumulada não reflete diretamente na queda de pressão residual. A queda de pressão residual na Figura 4.17 foi praticamente constante, contudo, a massa residual acumulada apresentada na Figura 4.16, só apresentou esse comportamento à partir do 65º ciclo. No que tange as curvas referentes à velocidade de 15 cm/s , foi verificado um comportamento semelhante entre queda de pressão residual e massa retida acumulada. RODRIGUES (2004), RODRIGUES (2006) e MAUSCHITZ et al. (2004) concluíram em seus trabalhos que as partículas remanescentes da limpeza no interior do meio filtrante, se reajustavam em novas posições na superfície das fibras acarretando uma menor perda de carga residual. Na Figura 4.8 (a) foi possível verificar que para a velocidade de 5 cm/s as partículas remanescentes ficaram na superfície das fibras, deixando os poros livres. Para a velocidade de 15 cm/s Figura 4.8 (b) as partículas remanescentes ficaram retidas entre as fibras, dificultando a passagem do fluido e consequentemente causando maior queda de pressão residual.

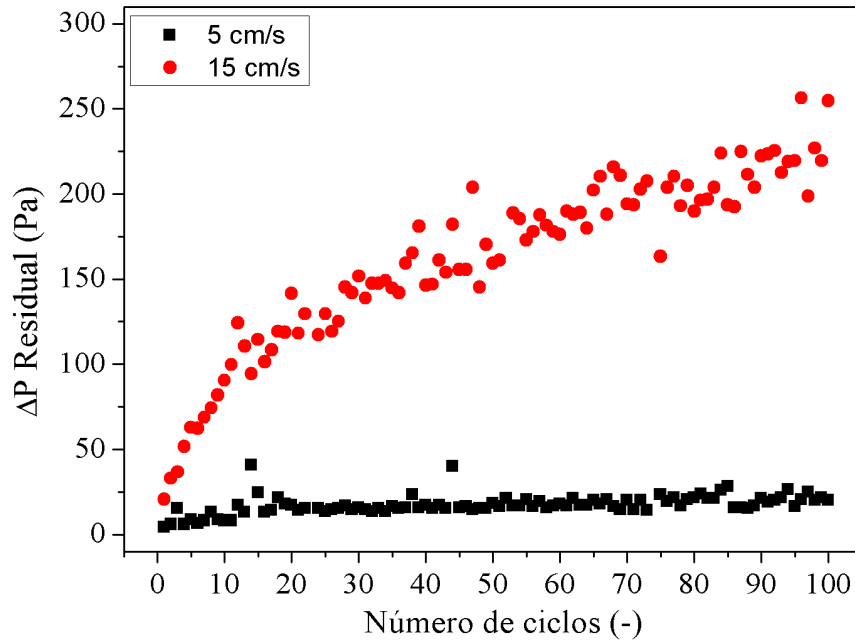


Figura 4.17: Queda de pressão residual em função do número de ciclos para as velocidades de 5 e 15 cm/s

As Figuras 4.17 e 4.16 mostraram uma reprodução experimental de uma condição de filtração para baixas velocidades.

O Valor da porosidade também variou com o número de ciclos, esta variação pode ser vista na Figura 4.18, em que a porosidade das tortas de filtração foram estimadas pela correlação de Ergun (Equação 2.19)

[figurageral/resultados/porosidadec.png](#)

Figura 4.18: Porosidade de Filtração em função do número de ciclos

Na Figura 4.18 constatou-se que o valor da porosidade diminuiu com o número de ciclos. Este resultado era esperado, haja vista que o sólido que não é removido do meio filtrante, diminui o período de filtração interna, e assim, a torta de filtração é formada mais rapidamente na superfície. E de acordo com a teoria da formação de tortas de filtração em camadas e força de compressão de CHOI et al. (2004a) a formação pré matura da torta da superfície, faz com que as camadas mais próximas ao meio filtrante sejam comprimidas pela carga mássica depositada posteriormente. A diferença observada entre os valores da porosidade da torta de filtração formada à velocidade de 5 e 15 cm/s , pode ser atribuída à maior carga mássica apresentada pelas maiores velocidades

relacionada a força de arraste dessas velocidade.

4.4 Estudo da Fluidodinâmica do Gás na Caixa de Filtração

Os dados que serão apresentados nessa seção correspondem à simulação da filtração de um fluido monofásico no sistema que representa na íntegra o sistema utilizado nos testes experimentais. A verificação dessa simulação se deu por meio dos valores de queda de pressão encontrados para cada situação simulada.

4.4.1 A Influência da Velocidade de Filtração na Fluidodinâmica do Gás

Os experimentos foram realizados em uma caixa de filtração vedada e portanto, não foi estudado experimentalmente o comportamento fluidodinâmico do gás no interior dessa caixa. Assim, foram realizadas simulações para prever este comportamento. Esse estudo foi dividido em três partes. A simulação do feltro de poliéster virgem frente a três velocidades superficiais de fluido, 5, 10 e 15 cm/s , visando a verificar a influência da velocidade na trajetória do gás no interior da caixa. Também foram realizadas simulações com velocidade de filtração constante para meios filtrantes submetidos a 1, 10 15 e 25 ciclos de filtração. E por último foram realizadas comparações entre as simulações realizadas para diferentes meios filtrantes, algodão, poliéster e polipropileno. As simulações em CFD mostraram-se coerentes fisicamente, haja vista que as quedas de pressão foram diretamente proporcionais às variações de velocidade do fluido. Outro ponto importante foi em relação aos valores de queda de pressão simulada, que apresentaram uma diferença média aproximada de 10% em relação ao valor experimental. Vale ressaltar que essas simulações foram feitas em conformidade com as condições de contorno e propriedades físicas apresentadas na Tabela 3.4.

De acordo com dados da literatura, assim como, os resultados experimentais desse estudo, o meio filtrante após a limpeza não apresentou uma regeneração completa (*patchy cleaning*), alterando as características desse meio. Por sua vez, essas características, também sofreram influência da velocidade de filtração, como foi discutido na Seção 4.2. Dessa forma, o ciclo de filtração subsequente na operação ocorreu sempre em um meio filtrante com características diferentes até o

momento de saturação do tecido, ou seja, o momento em que as alterações foram aproximadamente constantes Seção4.3.

Na Figura 4.19 pode ser visto o perfil de pressão ao longo da caixa de filtração. Nessa figura pode-se verificar uma queda brusca nos valores de pressão quando o fluido percola o meio filtrante. Outro ponto interessante observado no perfil de pressão foi a proporcionalidade na variação da pressão antes e após o filtro (ΔP), em que essa diferença aumentava com o aumento da velocidade superficial do gás, ou seja, diretamente proporcional à velocidade do gás na seção cilíndrica do equipamento. Ainda foi possível constatar que ao se aproximar do meio filtrante, o fluido sofreu uma desaceleração; essa parcela de energia cinética perdida foi transferida automaticamente para o componente da energia de pressão, justificando o incremento apresentado nos valores de pressão para as curvas referentes à velocidade de 10 e 15 cm/s .

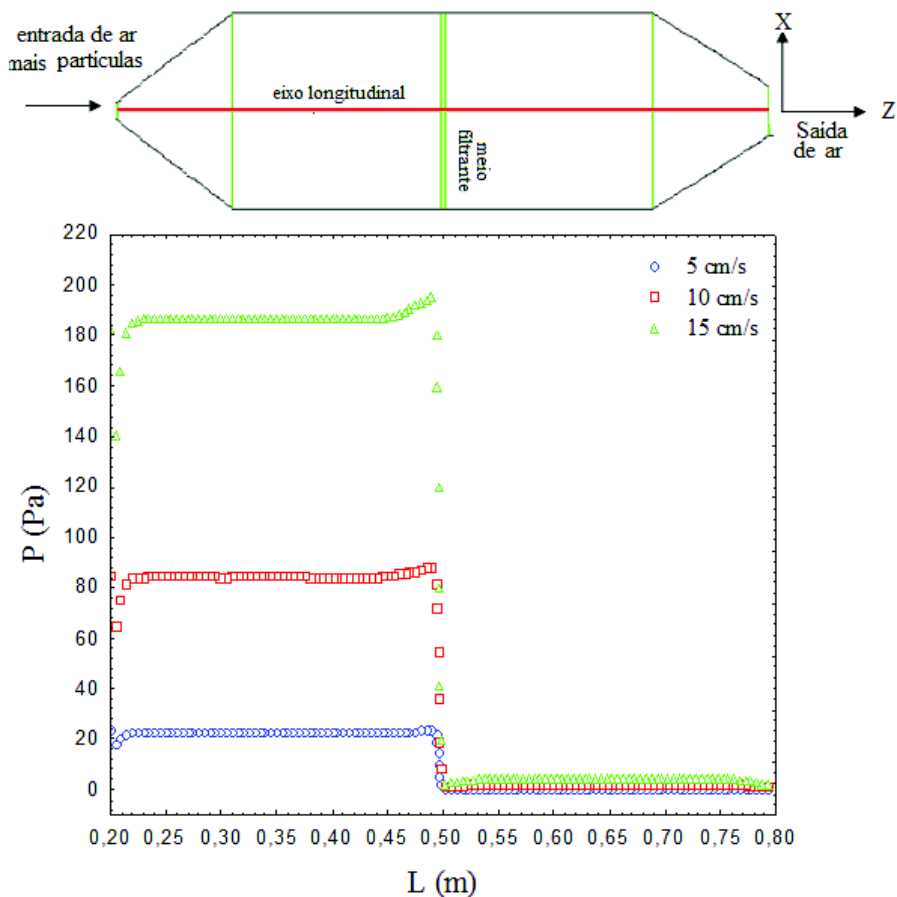


Figura 4.19: Perfil de pressão ao longo do eixo longitudinal da caixa de filtração

Para se analisar a influência dessas variações de pressão e conseqüentemente de velocidade ao

longo do escoamento do fluido, foi traçado o perfil de velocidade para os três valores de velocidade superficial estudado. Esses perfis de velocidade podem ser vistos na Figura 4.20.

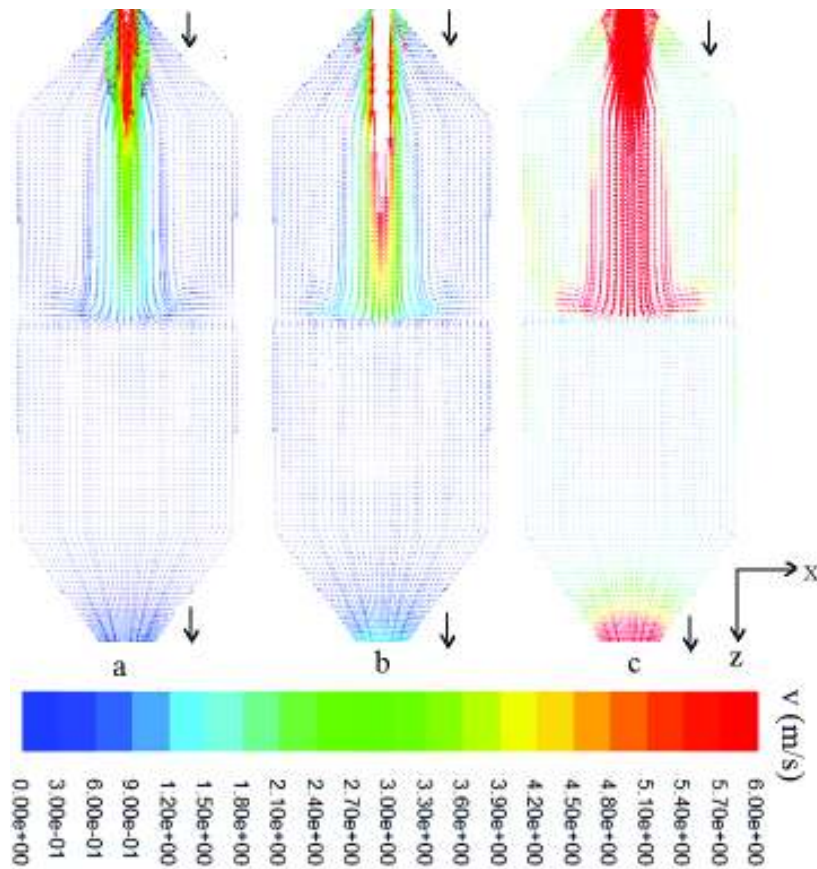


Figura 4.20: Perfil de velocidade à montante do meio filtrante nas velocidades de (a) 5 cm/s ; (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s

Na Figura 4.20 pode-se constatar que para as três velocidades a distribuição do fluido sobre a superfície de entrada do filtro apresentou diferenças. A maior velocidade do fluxo de gás estava no eixo do equipamento para as três velocidades. Portanto, o fluido atingiu o meio filtrante inicialmente pelo centro. A resistência oferecida por esse meio ao fluxo, fez com que ocorresse um espalhamento desse jato, que difundia sobre o meio filtrante antes de percolar esse meio. Este espalhamento na direção radial foi maior para as maiores velocidades (Figura 4.20). Sendo a operação de filtração constante, pode-se comparar o escoamento do fluido na caixa de filtração como de um fluxo pistonado, logo existe uma outra camada de fluido forçando a passagem da camada que se espalhou. Assim, parte desse fluido percolou o meio filtrante, e outra parte inverteu o sentido do escoamento causando uma perturbação à montante do meio filtrante (Figura 4.21), como

uma recirculação de gás no espaço entre o eixo e a carcaça do equipamento. Durante a realização dos experimentos, para essas velocidades, foi observada uma deposição de material particulado nas paredes da caixa de filtração. Para a velocidade de 15 cm/s a massa depositada, aumentou, ficando em torno de 3,6 g. Para as demais velocidades, de 10 e 5 cm/s , a massa média depositada foi de 3,1 e 2,3 g respectivamente.

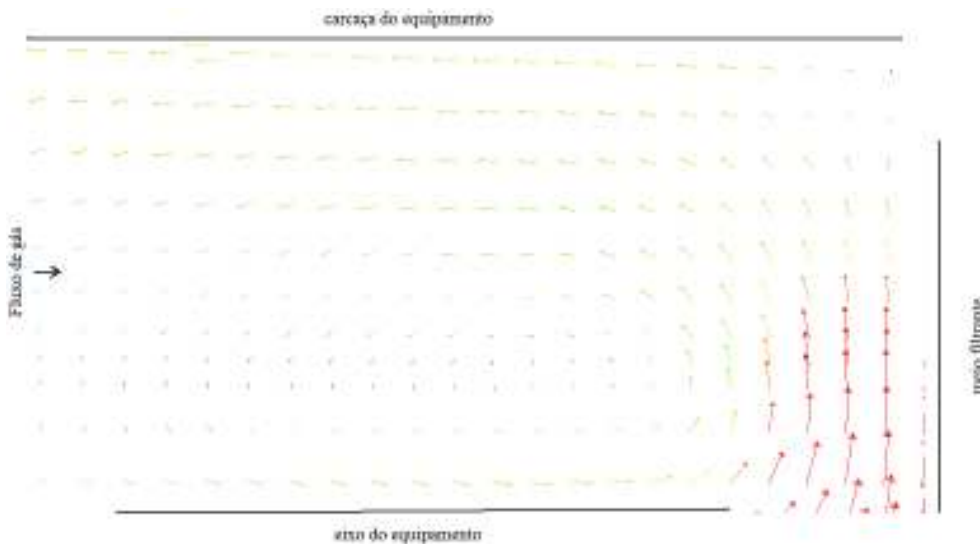


Figura 4.21: Recirculação do fluido na região entre o eixo e a carcaça do equipamento para a velocidade superficial de 15 cm/s

De forma a vislumbrar essa distribuição do fluido sobre o meio filtrante, bem como as regiões de recirculação na seção montante ao meio filtrante, foram traçadas quatro curvas para refinar essa região. Em que:

- curva 1: interface cone/cilindro $Z = 0,305\text{m}$;
- curva 2: 2 cm à montante do meio filtrante $Z = 0,475\text{m}$;
- curva 3: 1 cm à montante do meio filtrante $Z = 0,485\text{m}$;
- curva 4: superfície de entrada do filtro $Z = 0,495\text{m}$;

A Figura 4.22 apresenta o perfil de velocidade na região à montante do meio filtrante nessas quatro curvas para as três velocidades estudadas.

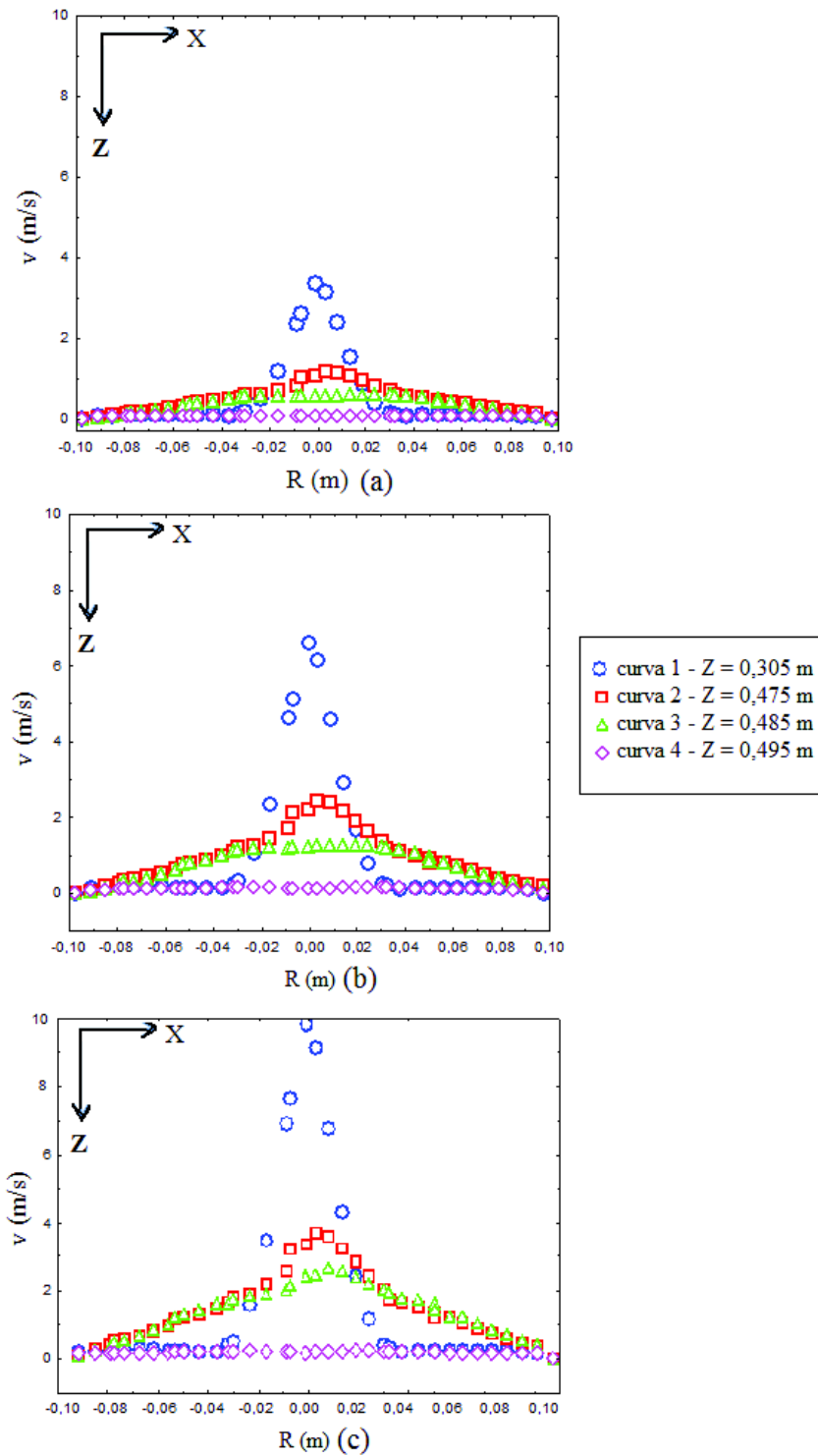


Figura 4.22: Perfil de velocidade à montante do meio filtrante nas velocidades de (a) 5 cm/s; (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s

Na Figura 4.22 pode ser vista uma desaceleração do fluido ao se aproximar do meio filtrante para as três velocidades, o que causa um “achatamento” das curvas de velocidade. A própria geometria do equipamento favorece a aceleração/desaceleração, causada pela expansão/contração do volume relaciona às partes cônicas na entrada e saída da caixa de filtração. A curva 1 por exemplo apresenta a maior velocidade entre as curvas, na parte central do equipamento e, uma velocidade baixa na região situada entre o eixo e as paredes da caixa de filtração. Essa curva foi traçada no plano XZ na entrada da parte cilíndrica. A alta velocidade dessa curva é explicada pela proximidade da saída do fluido da parte cônica, ou seja é medida antes da expansão volumétrica, que ocasiona a desaceleração do fluido no interior da parte cilíndrica. Por outro lado, a baixa velocidade nas laterais da caixa pode ser explicada pela condição de não deslizamento ou aderência, em que próximo a carcaça e meio filtrante, o fluido tende a acompanhar a velocidade da parede da caixa de filtração, semelhante ao perfil de escoamento em tubos, ou seja, máximo no centro e zero nas paredes. A proximidade do meio filtrante diminui os valores da velocidade.

A curva 4 (superfície do meio filtrante) da Figura 4.22 apresenta um comportamento quase linear para as três velocidades devido ao espalhamento causado pela resistência do filtro ao escoamento. Assim, o fluido percola o meio filtrante de forma uniforme. Para se verificar o comportamento do fluido ao atravessar o meio filtrante foi realizado o mapeamento da velocidade no meio filtrante. O meio filtrante possui uma espessura de $2,5mm$, e foram traçadas cinco curvas nessa região para levantamento do perfil de velocidades (Figura 4.23). Sendo essas:

- curva 4: superfície de entrada do filtro $Z = 0,495m$;
- curva 5: $1/4$ da espessura do meio filtrante $Z = 0,495625m$;
- curva 6: $1/2$ da espessura do meio filtrante $Z = 0,49625m$;
- curva 7: $3/4$ da espessura do meio filtrante $Z = 0,496875m$;
- curva 8: superfície de saída do filtro $Z = 0,4975m$;

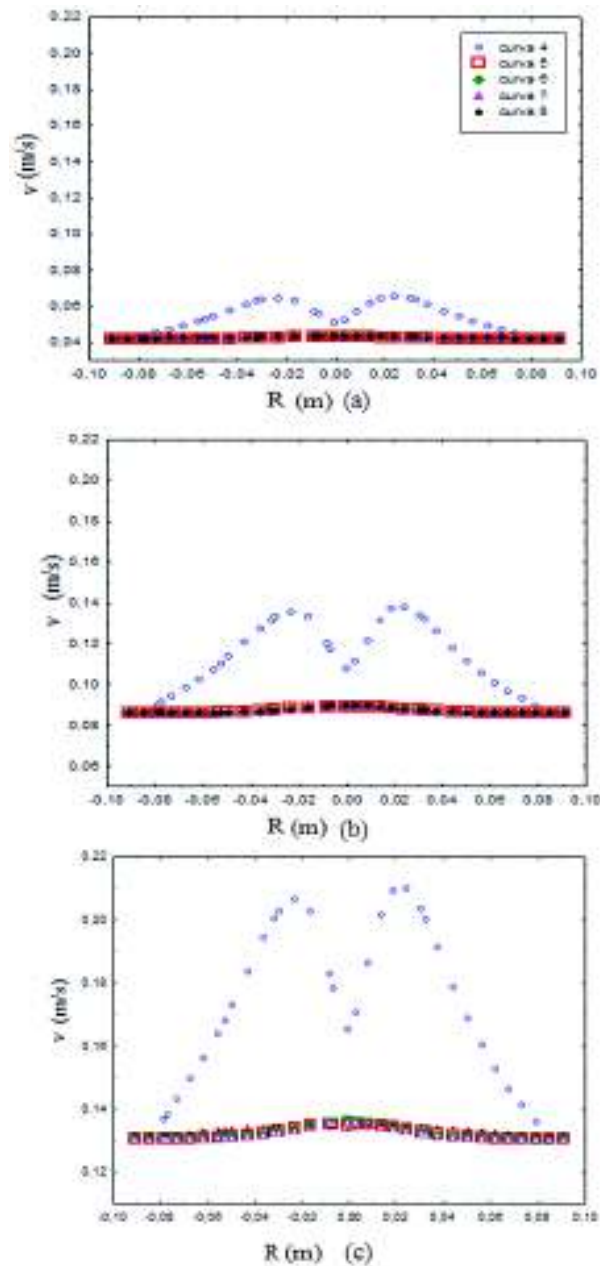


Figura 4.23: Perfil de velocidade no interior do meio filtrante para as velocidades superficiais de (a) 5 cm/s; (b) 10 cm/s e (c) 15 cm/s

Como era esperado ao se observar a Figura 4.20, em que a trajetória do fluido não sofreu variações no interior do meio filtrante. Visto que este escoava no meio filtrante de acordo com a teoria de Poiseuille, ou seja, o escoamento no meio filtrante se deu como o escoamento em capilares. Portanto, pode se dizer que esse gás atravessou o meio confinado em vários canais

(poros) e ao chegar na superfície sofre uma expansão perdendo sua velocidade e saindo de forma uniforme dessa interface. Explicando assim a não variação da velocidade do fluido dentro do meio filtrante (Figura 4.23). Para ilustrar a variação de velocidade existente entre a entrada e a saída do meio filtrante as curvas da superfície de entrada e saída do filtro, curva 4 e 8 respectivamente, foram plotadas separadamente para as três velocidades estudadas e são apresentadas na Figura 4.24. As curvas referentes ao interior do meio filtrante não foram traçadas por não terem apresentado variações.

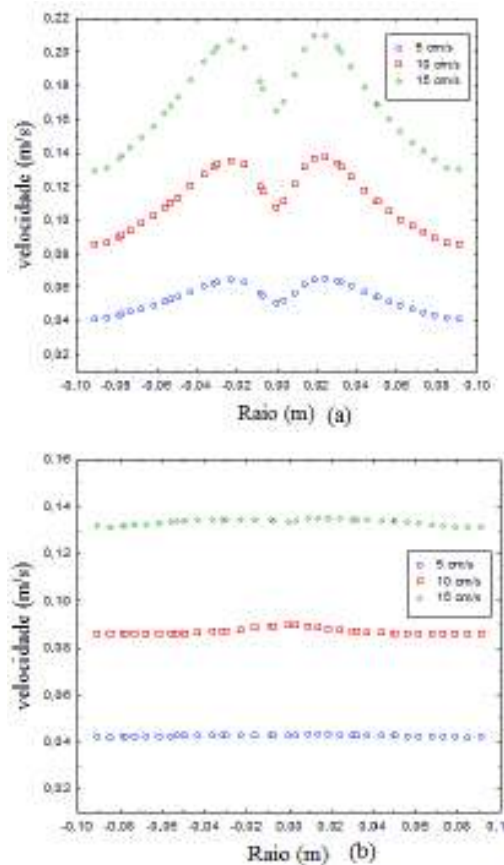


Figura 4.24: Perfil de velocidade na superfície de entrada do meio filtrante (a) e saída do meio filtrante (b)

As Figuras 4.23 e 4.24 mostram que a proporcionalidade entre as velocidades foram conservadas ao atravessar o meio filtrante. Consequentemente as maiores velocidades venceram mais facilmente a resistência oferecida pelo meio filtrante que as menores velocidades. Essa pode ser a explicação para a maior deposição de partículas em meios filtrantes. Fato esse também relatado pelos autores TANABE (2008) e MARTINS (2001), para as maiores velocidades superficiais.

Após estudar a fluidodinâmica do escoamento do gás a montante do meio filtrante e no interior desse, também foi estudado o comportamento do fluido à jusante do meio filtrante. A Figura 4.20 apresentou zonas de aceleração do fluido a jusante do meio filtrante no eixo do equipamento, assim como, na região entre o eixo e a carcaça do equipamento, que foram mais acentuadas para as maiores velocidades. O comportamento das curvas referentes às três velocidades estudadas foi idêntico, apenas diferenciando em relação à proporção da velocidade. Portanto, a Figura 4.25 apresenta apenas a figura relativa à velocidade de 10 cm/s para as quatro posições estudadas à jusante do meio.

- curva 8: superfície de saída do filtro $Z = 0,4975\text{m}$;
- curva 9: 1cm à jusante do meio filtrante $Z = 0,5075\text{m}$;
- curva 10: 2cm à jusante do meio filtrante $Z = 0,5175\text{m}$;
- curva 11: interface cilindro/cone $Z = 0,6875\text{m}$;

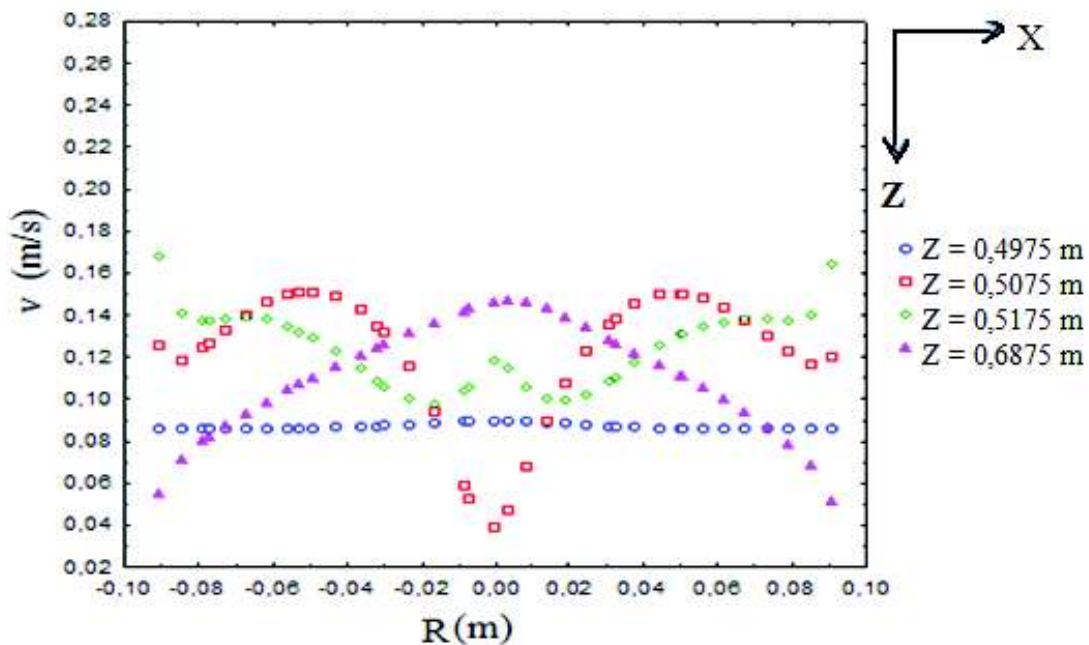


Figura 4.25: Perfil de velocidade a jusante do meio filtrante para a velocidade de 10 cm/s

Na Figura 4.20 também foi possível observar que imediatamente após o filtro, o fluido se encontrava a uma velocidade menor. Essa condição se prolongava no eixo do equipamento por

mais alguns centímetros, como pode ser confirmado na Figura 4.25 em que a curva da posição 9 (1 cm abaixo do meio filtrante) apresentava a menor velocidade à jusante do meio. Abaixo da camada estagnada apresentada na saída do filtro (curva 8, interface de saída do meio filtrante), o gás apresentou uma aceleração na região entre o eixo e a carcaça. Para essa região as três curvas traçadas abaixo do meio filtrante apresentaram maior velocidade que as demais. Na curva 10 (2 cm abaixo do meio filtrante) iniciava uma reversão do fluxo de gás, causada pela diminuição da área, visto que o gás estava escoando para a região cônica (menor área), essa reversão foi confirmada pela curva 11 (interface cilindro/cone) que apresentou os maiores valores de velocidades no eixo do equipamento.

4.4.2 A Influência do Número de Ciclos na Fluidodinâmica do Gás

A Seção 4.3 mostrou que o número de limpezas e filtrações alteraram a estrutura física do meio filtrante, e assim, influenciou na fluidodinâmica do gás dentro da caixa de filtração. Para se observar essas variações da fluidodinâmica foram realizadas simulações para meios filtrantes após 1, 10, 15 e 25 limpezas. Os ciclos de filtração influenciaram os valores de permeabilidade e de porosidade. A permeabilidade foi determinada experimentalmente (3.6), e a porosidade foi determinada pela correlação de Ergun (Equação 2.19) e estão na Tabela 4.5, as demais propriedades foram as mesmas utilizadas para a simulação do meio filtrante virgem e se encontram na Tabela 3.4.

Tabela 4.5: Dados de Porosidade e Permeabilidade Usados na Simulação para os Tecidos após Limpeza

Número de ciclos	1	10	15	25
Porosidade (%)	51	51	50	49
Permeabilidade $m^2 \cdot 10^{10}$	2,04	0,59	0,46	0,33

Os Perfis de velocidade foram construídos para os tecidos virgem, após 1, 10, 15 e 25 ciclos de filtração, para a velocidade de 10 cm/s , que podem ser vistos na Figura 4.26.

A semelhança encontrada nas simulações para o tecido virgem e impregnado com material particulado após o primeiro de filtração, foi devido o feltro de poliéster tratado ter apresentado boa regeneração após a primeira limpeza. esse acontecimento pode ser confirmado pela literatura que apresentaram uma saturação do feltro de poliéster após o sétimo ciclo de filtração. Dessa forma

a simulação para o meio filtrante após o primeiro ciclo não apresentou variação significativa em relação ao tecido virgem. Para o décimo ciclo, ocorreu um aumento no espalhamento do fluido na superfície do filtro, assim como, maior recirculação de gás à montante do meio filtrante. Na parte da caixa à jusante do meio filtrante também ocorreu incremento da velocidade em relação ao tecido virgem e com um ciclo de filtração. O meio filtrante já se encontrava saturado no ciclo dez, assim não apresentou variações significativas para os demais ciclos. Este fato pode ser comprovado na Figura 4.26, em que os perfis de velocidade desse meio filtrante após 10, 15 e 25 ciclos são muito semelhantes.

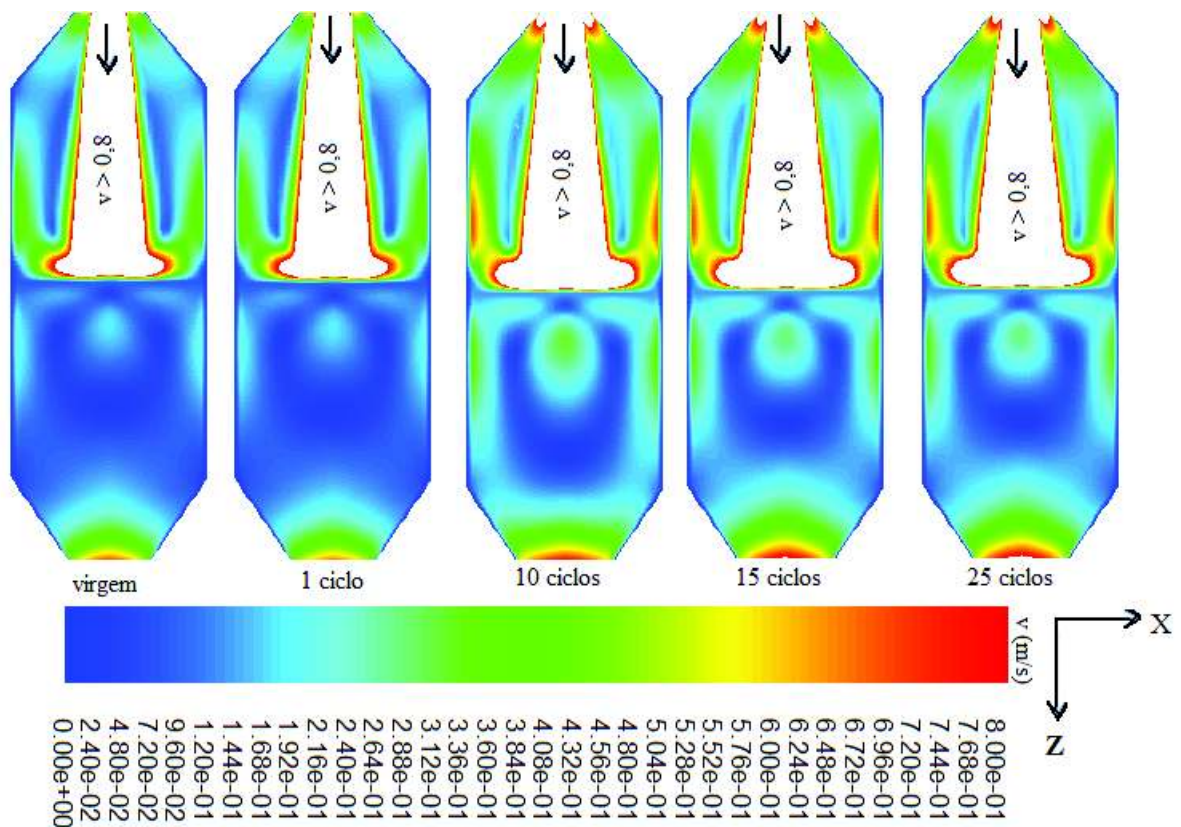


Figura 4.26: Perfil de velocidade em diferentes ciclos de filtração para a velocidade superficial de 10 cm/s

A Figura 4.27 mostra os perfis de velocidade na forma vetorial para o primeiro e o décimo ciclo a velocidade superficial de filtração de 10 cm/s . Na Figura 4.27, confirma que o fluxo ao se deparar com a resistência do meio filtrante, perde parte de sua velocidade longitudinal que se transfere para a componente radial. Esta Figura ainda permite constatar que para a velocidade de

15 cm/s maior quantidade de fluido percola o meio filtrante, provavelmente por tem mais força para vencer a barreira.

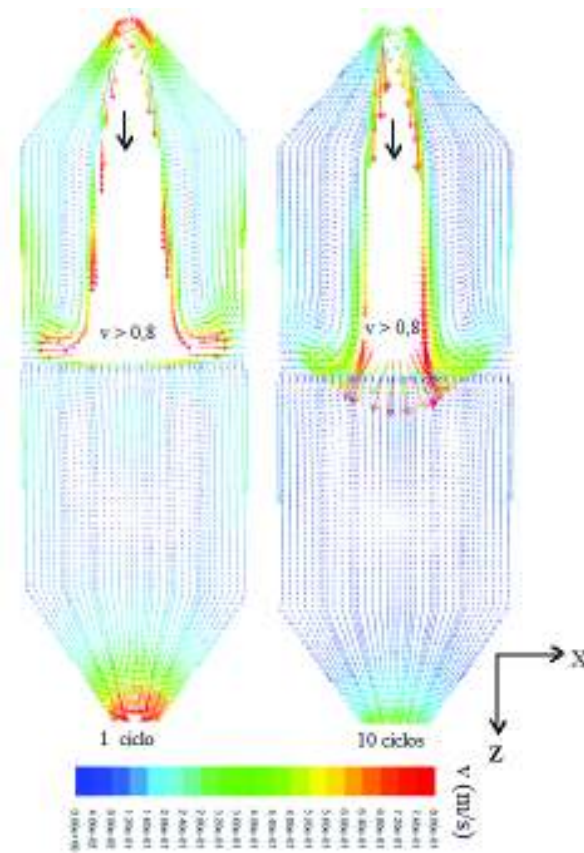


Figura 4.27: Perfil de velocidade em diferentes ciclos de filtração para a velocidade superficial de 10 cm/s

O perfil de velocidades não sofreu alterações do tecido virgem e para o tecido após a primeira filtração, portanto, o tecido não estava saturado e com isso, não alterou a dinâmica do gás dentro do tecido. Dessa forma para os 10 ciclos de filtração simulados possibilitou maior recirculação do ar a montante do meio filtrante e uma aceleração do gás em alguns pontos a jusante do meio, esses pontos estão melhor representados nas Figuras 4.28 e 4.29.

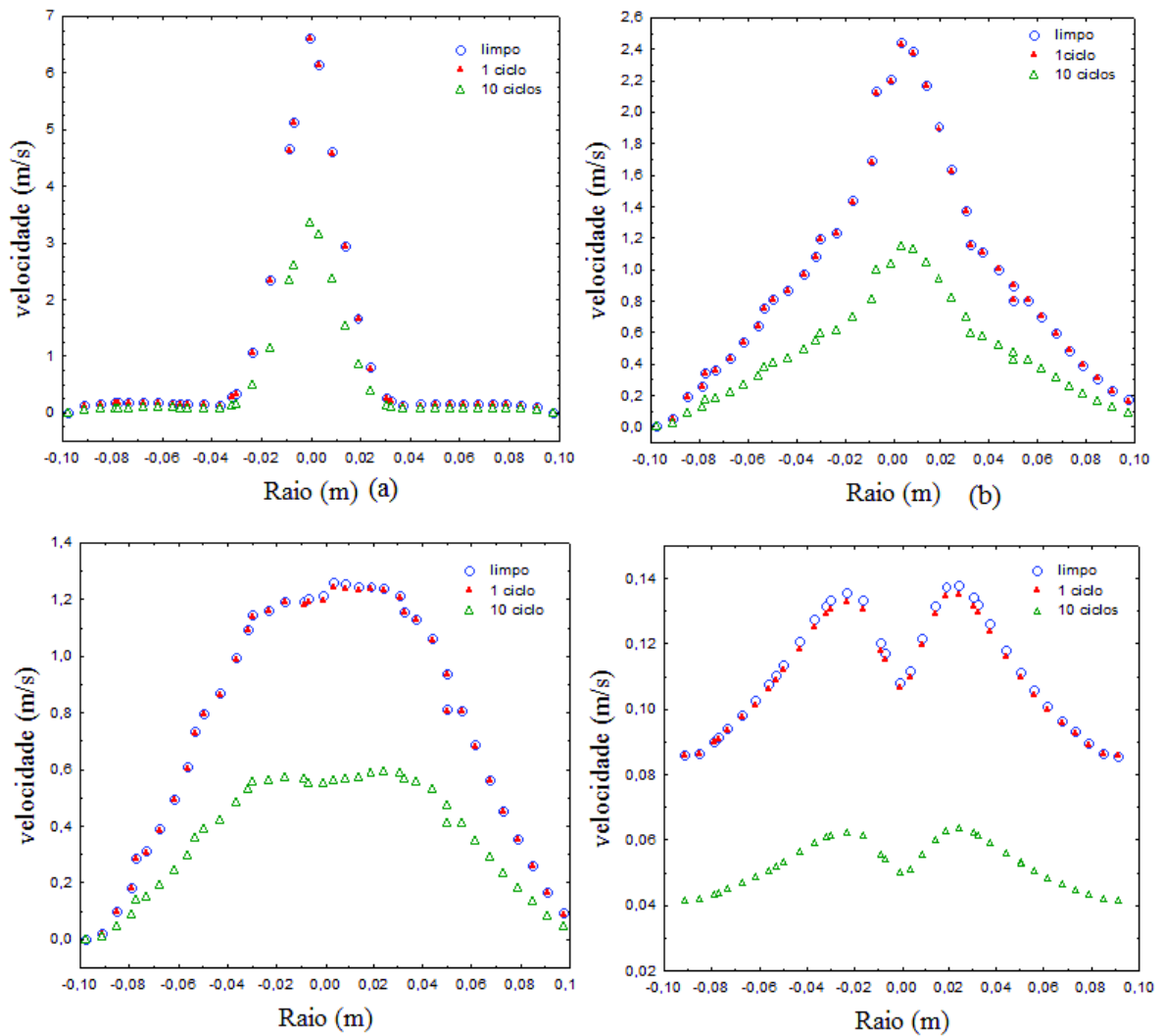


Figura 4.28: Curvas de velocidade a montante do meio filtrante, a: $Z = 0,305m$; b: $Z = 0,475m$; c: $Z = 0,485m$; d: $Z = 0,495m$;

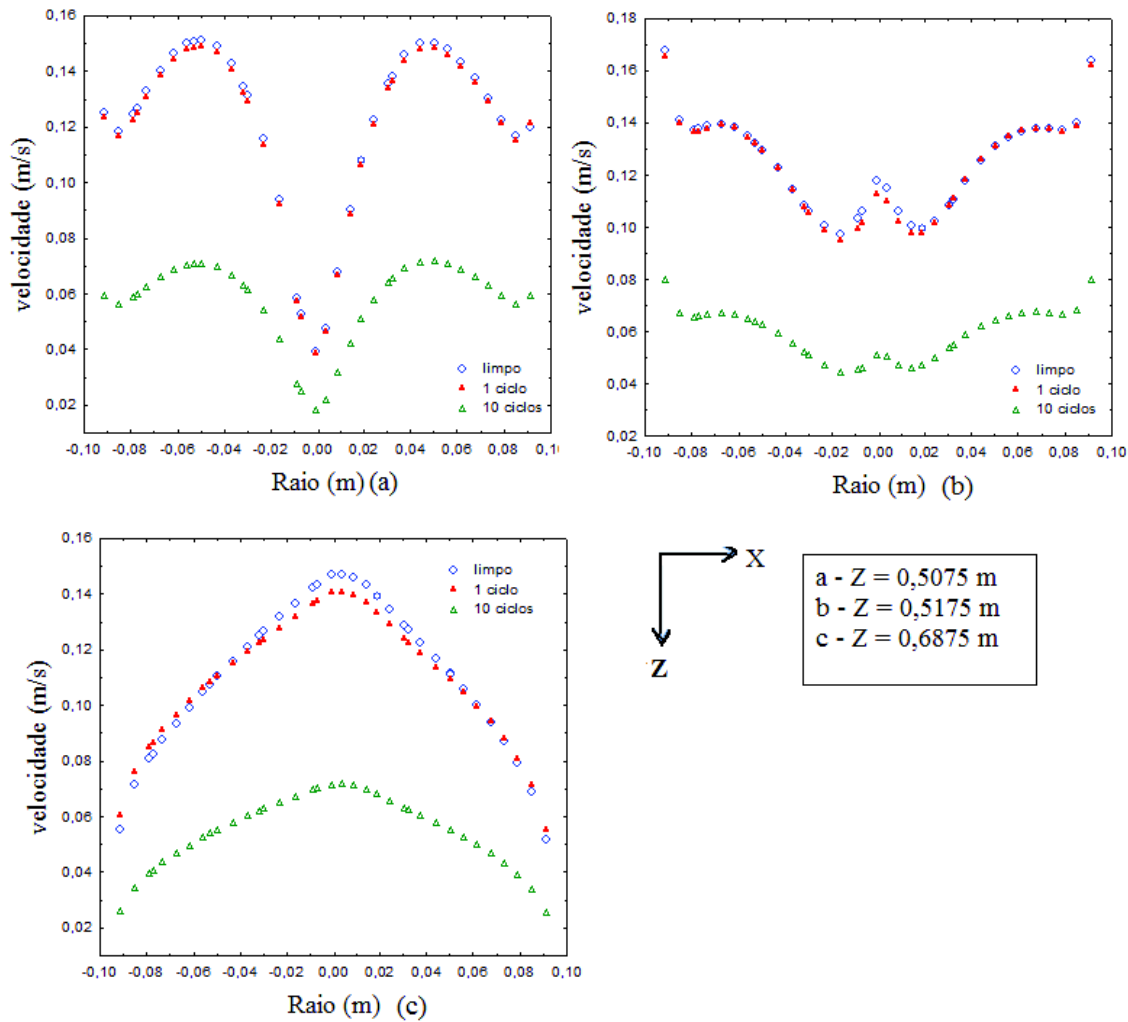


Figura 4.29: Curvas de velocidade a jusante do meio filtrante

4.5 A Influência da estrutura do Meio Filtrante na Fluidodinâmica do Gás

As propriedades físicas e estruturais dos tecidos de filtração têm influência marcante na operação de limpeza de gases em filtros de mangas, visto que são neles que acontecem a coleta do material particulado e a remoção deste material durante a limpeza do filtro (RODRIGUES, 2004). Existem diversas fibras que são utilizadas na confecção dos tecidos empregados na filtração. Além de se diferirem quanto a sua origem, os tecidos usados na filtração ainda se subdividem em trançados e não trançados. O tecido de fibra de algodão é constituído por fibras trançadas como mostra

a Figura 4.30.

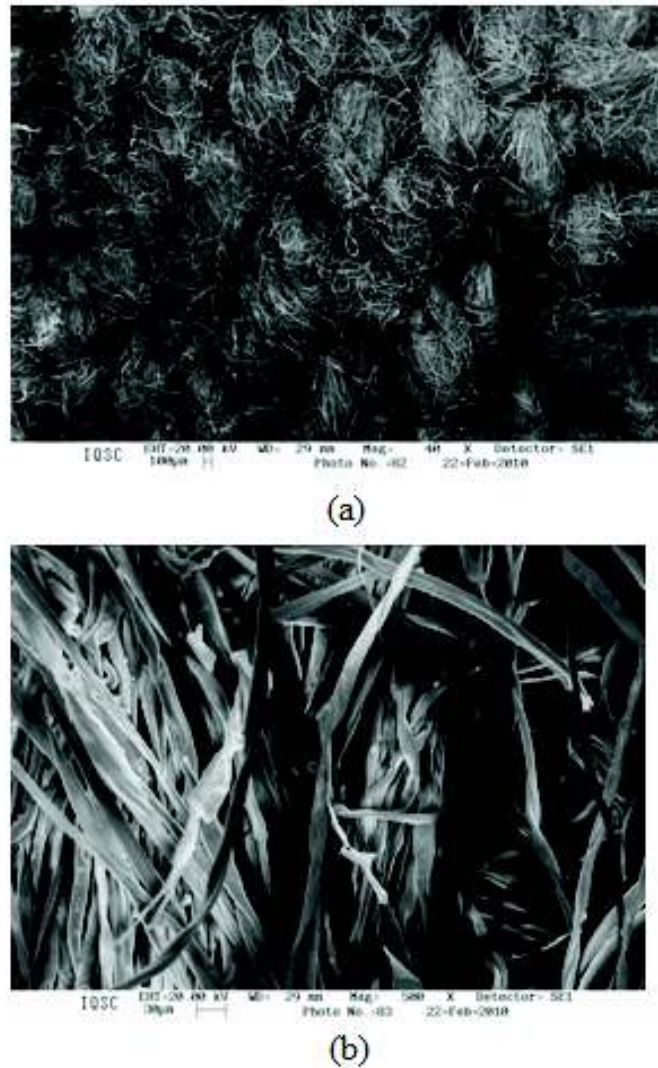


Figura 4.30: Micrografia de um tecido de algodão trançado mostrando a forma das fibras, obtida em MEV do IQ/SC - USP, (a) com aumento de 50 vezes, (b) com aumento de 500 vezes.

Na Figura 4.30 (a) verifica-se que o tecido de algodão é um tecido trançado (fibras ordenadas) e bastante fechado sem vazios entre os fios [Figura 4.30 (b)]. Observa-se ainda que as fibras do tecido de algodão são achatadas e retorcidas, com diâmetro pouco uniforme variando entre 7 e 19 μm .

Fibras sintéticas são aquelas produzidas a partir de soluções químicas que não são derivadas de fibras naturais e que são processadas para formar polímeros de cadeias longas. Um exemplo

de fibras sintéticas são as fibras de polipropileno que constituem um feltro agulhado, ou seja, um tecido não trançado como pode ser observado na Figura 4.31.



Figura 4.31: Micrografia de um tecido de polipropileno trançado mostrando a forma das fibras, obtida em MEV do IQ/SC - USP, (a) aumento de 50 vezes e (b) aumento de 500 vezes.

O feltro de polipropileno apresentou um arranjo desordenado das fibras do tecido, com a presença de muitos espaços vazios no empacotamento (poros). As fibras do polipropileno apresentaram acabamento mais liso do que as do algodão, sendo também mais arredondas e possuíam diâmetro maior do que as fibras do algodão e mais uniforme, apresentando uma variação média entre 20 e 22 μm , e na Figura 4.31 (a) se nota várias áreas com fibras fundidas resultantes do tratamento de calandragem e chamuscamento.

As micrografias em MEV com aumento de 500 vezes mostraram que as fibras de algodão são mais fechadas quando comparadas às fibras de polipropileno, como mostram as Figuras 4.30 (b)

4.31 (b).

A queda de pressão inicial no primeiro ciclo de filtração para o tecido de algodão foi de 156,9 (Pa), bem superior do que a apresentada no primeiro ciclo de filtração para o feltro de polipropileno, que foi de 29,42 (Pa). O tecido de algodão também apresentou maior resistência à permeabilidade do ar ao ser comparado com o polipropileno, de acordo com os resultados apresentados na Tabelas 4.6. Confirmando assim, o que foi observado na Figura 4.31, ou seja, o tecido de algodão é mais fechado que o feltro de polipropileno de acordo também com as porosidades apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Características dos tecidos estudados

	Polipropileno		Algodão	
	Virgem	Impregnado	Virgem	Impregnado
E (mm)	2,75	2,75	1,6	1,6
ϵ (%)	79,0	66,0	57,7	49,0
K (m^2)	$2,3 * 10^{-10}$	$3,68 * 10^{-10}$	$4,08 * 10^{-11}$	$2,7 * 10^{-11}$

Era esperado que um tempo menor de filtração para o tecido de algodão atingir a perda de carga máxima estipulada de 2270 Pa, para a velocidade de filtração de 5 cm/s, do que para o feltro de polipropileno. No entanto, o filtro de algodão apresentou um tempo de filtração de 500 s contra 330 s do polipropileno. Comportamento semelhante para esses tecidos foi encontrado por (RODRIGUES, 2004), com um tempo de 1000 s para o polipropileno e 1200 s para o algodão, com uma velocidade de 6 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.

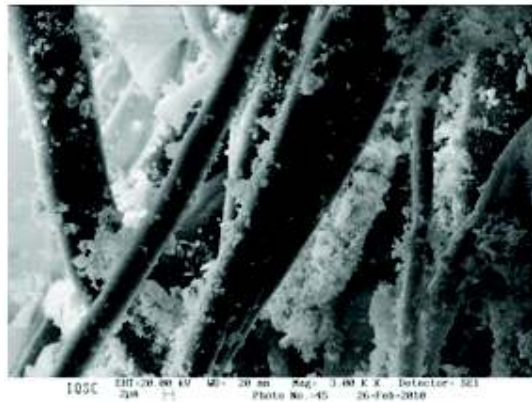
RODRIGUES (2004) concluiu que entre os ciclos em que ocorreu a saturação dos respectivos tecidos, quinto ciclo para o polipropileno e terceiro ciclo para o algodão, a diferença de arraste inicial tendeu a se uniformizar com a formação da torta. Esse autor encontrou curvas sobrepostas para os ciclos subsequentes à saturação, revelando que o preenchimento dos poros do tecido de polipropileno levava a uma diminuição da permeabilidade do meio filtrante.

A Figura 4.32 (a) e (b) apresenta micrografias das fibras de algodão e de polipropileno após uma filtração e uma limpeza. Em que se observa que a as partículas no polipropileno (Figura 4.32 (a)) ficaram presas entre as fibras, diminuindo os poros do feltro. Enquanto nas fibras de algodão pode se observar na Figura 4.32 (b), que as partículas ficaram aderidas às fibras. O arraste inicial de ambos os tecidos aumentou para o segundo ciclo de filtração, passando de 3330 para 4900 para

o polipropileno e, de 2730 para 3880 para o algodão. Esse comportamento era esperado porque os tecidos são saturados a cada ciclo realizado, transformando o meio filtrante em outro mais fechado e de maior arraste.



(a)



(b)

Figura 4.32: Micrografia obtida em MEV do IQ/SC - USP, com aumento de 1000 vezes, (a) polipropileno e (b) algodão.

Os dados apresentados nessa seção correspondem à simulação da filtração de um fluido monofásico no sistema que representa na íntegra o sistema utilizado nos testes experimentais. A validação dessa simulação se deu por meio dos valores de queda de pressão encontrados para cada situação simulada como mostra a Tabela 4.7. A diferença percentual entre os valores simulados e experimentais foram menores do que 10% para todas as situações estudadas, podendo atribuir essas diferenças à influências externas não controláveis durante os testes de filtração.

A Figura 4.33 apresenta os perfis de velocidade do fluido para as quatro condições estudadas, feltro de polipropileno e tecido de algodão limpos (virgem) e os mesmos meios impregnados com

material particulado após uma filtração e uma limpeza.

Tabela 4.7: Comparação entre os valores de perda de carga experimental e simulados

	$-\Delta P$ (Pa)	
	Virgem	Impregnado
Algodão experimental	892,40	1431,77
Algodão Simulado	891,5	1395,81
Polipropileno experimental	117,68	127,48
Polipropileno simulado	105,8	118,23

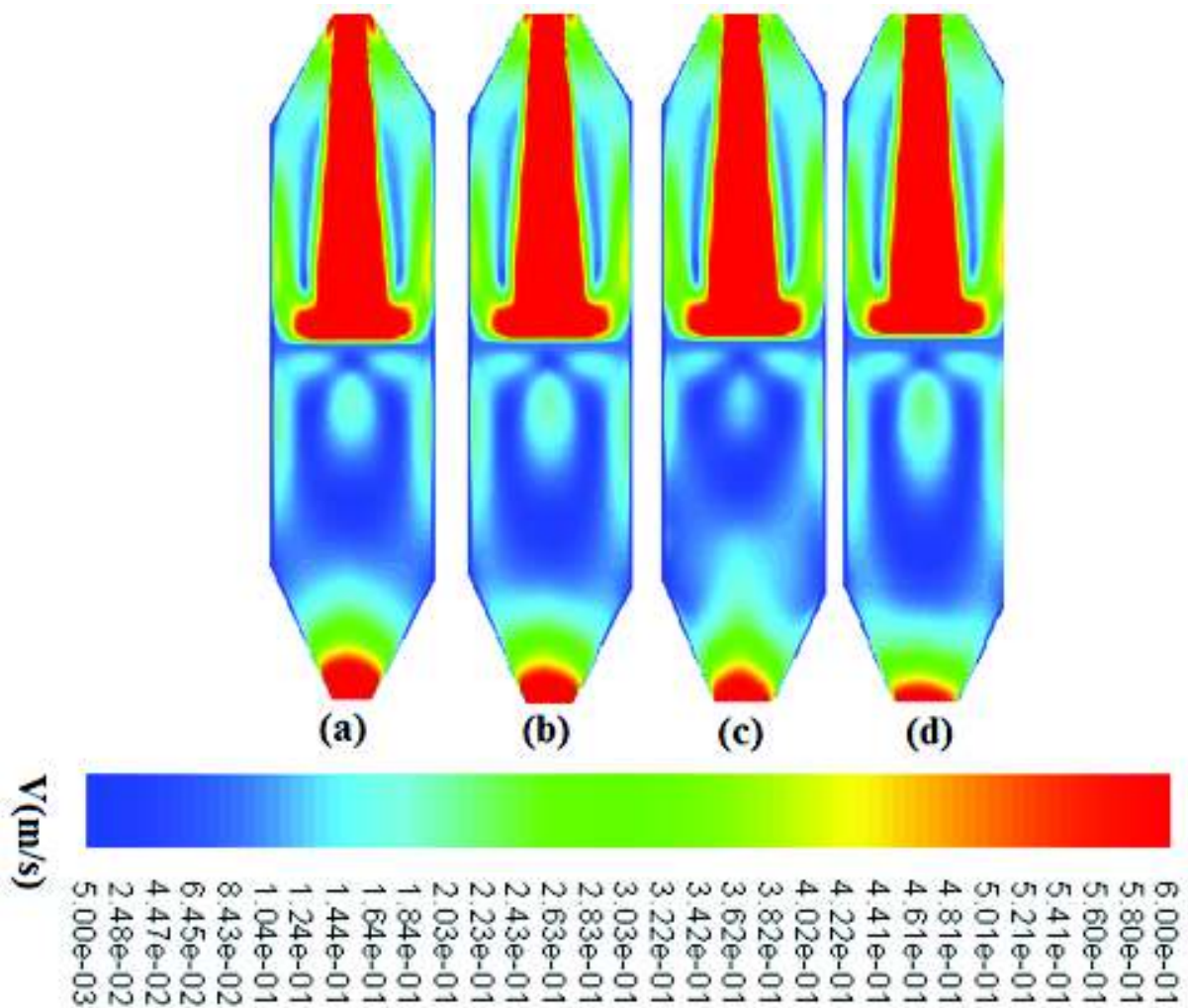


Figura 4.33: Perfis de velocidade para (a) algodão limpo, (b) algodão impregnado, (c) polipropileno limpo e (d) polipropileno impregnado.

Pode se observar na Figura 4.33 que a velocidade do fluxo de ar no tecido limpo é maior para o algodão (a) do que para o polipropileno (c), confirmando aquilo que já fora discutido com base na

Figura 4.31. Para a mesma velocidade de filtração, o tecido mais fechado apresentou uma aceleração no fluxo, visto que a vazão era constante. Quando se compara os tecidos de algodão limpo (a) e impregnado (b), observa-se que a velocidade do fluido foi maior para o tecido impregnado porque os poros nessa situação tiveram seu tamanho diminuído pelo material particulado remanescente da limpeza, o que pôde ser confirmado com a Figura 4.32.

Ao se comparar os perfis de velocidade para os meios filtrantes impregnados, algodão (b) e polipropileno (d), esperava-se que o algodão apresentasse maior velocidade, como na comparação entre esses tecidos limpos, mas o polipropileno apresentou um perfil de velocidade à jusante o meio filtrante bem superior ao de algodão, como se pode observar nas Figuras 4.33 e 4.36. A Figura 4.32 explica tal comportamento porque, apesar do polipropileno reter menos material particulado que o algodão, pela geometria de suas fibras, as partículas remanescentes no algodão se encontraram aderidas às fibras de tecido, enquanto no polipropileno essas partículas estavam em sua maioria obstruindo os poros entre as fibras do tecido.

Para se confirmar os perfis de velocidade apresentados na Figura 4.33, bem como apresentar a fluidodinâmica do gás frente ao meio filtrante, foram levantadas curvas para o perfil de velocidade, antes e após o filtro. As linhas 1 e 3 se encontram a dois centímetros do meio filtrante, enquanto as linhas 2 e 4 estão a quatro centímetros do filtro. Todas foram consideradas ao longo do diâmetro da parte cilíndrica da unidade experimental (simulada).

As curvas referentes aos pontos escolhidos são apresentadas nas Figuras 4.34 a 4.40. As curvas da posição (1) e (2), a montante do meio filtrante ficaram sobrepostas para as quatro situações estudadas, confirmando o perfil observado na Figura 4.33, em que o comportamento a montante do meio filtrante foi igual para (a), (b), (c) e (d).

Nas Figuras 4.34 e 4.35 nota-se que as maiores velocidades do gás a montante do filtro se encontravam na parte central (eixo do equipamento) e, a proximidade do meio filtrante (2 cm) elevou esses valores de velocidade para a parte central. As velocidades foram diminuindo ao se aproximarem das paredes da caixa de filtração, efeito esse que pode ser explicado pela condição de não deslizamento ou aderência, em que próximo a carcaça o fluido tende a acompanhar a velocidade da parede da caixa de filtração, semelhante ao perfil de escoamento em tubos, ou seja, máximo no centro e zero nas paredes.

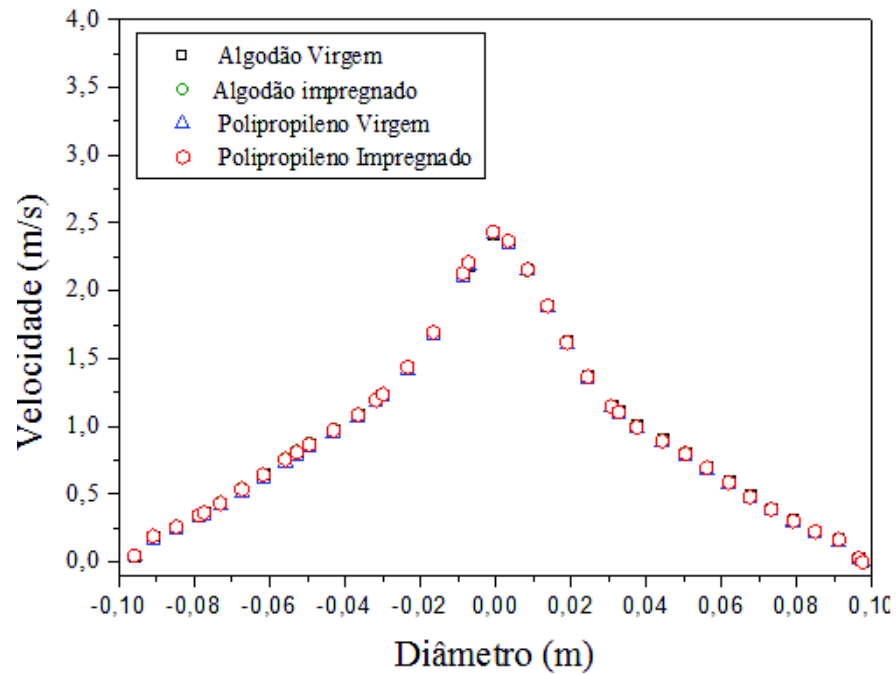


Figura 4.34: Perfil de velocidade na posição (1) a 2 cm à montante do meio filtrante

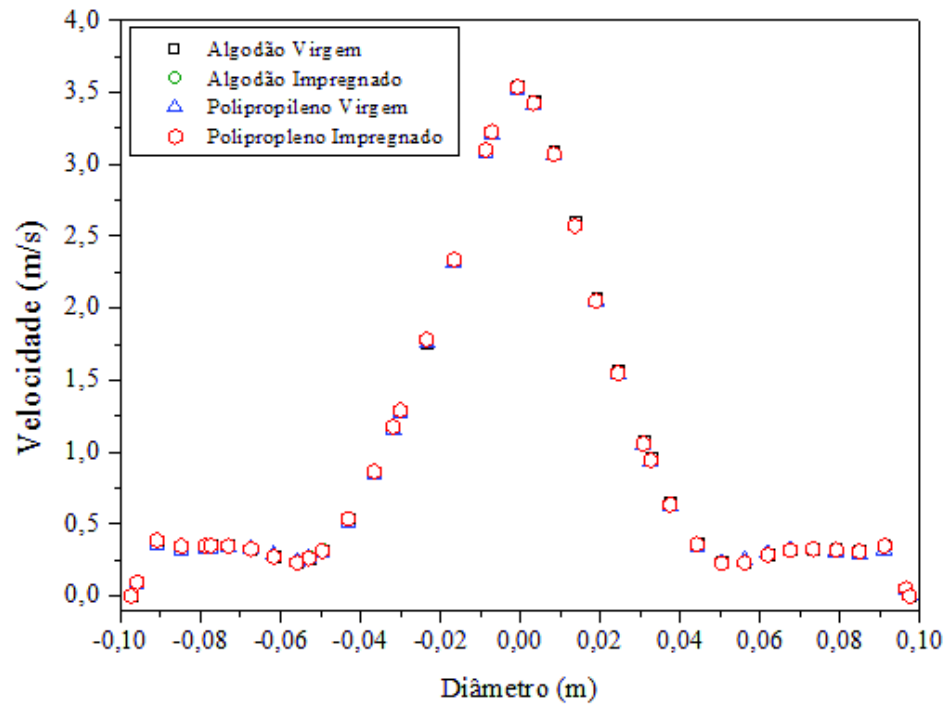


Figura 4.35: Perfil de velocidade na posição (2) a 1 cm à montante do meio filtrante

Os perfis de velocidade à jusante do meio filtrante foram diferentes entre si, a Figura 4.36 apresenta os perfis de velocidade para o algodão e para o polipropileno virgem.

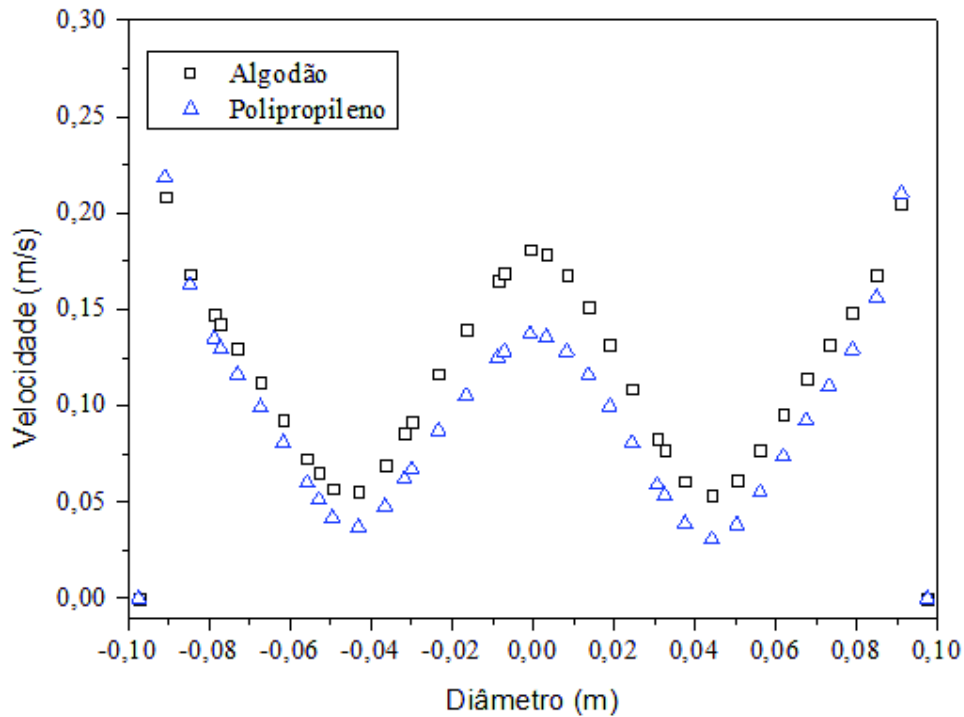


Figura 4.36: Perfis de velocidade para o algodão e o polipropileno virgem

Na Figura 4.36 pode se observar que as velocidades do fluxo de ar à jusante do meio filtrante foram maiores para o tecido de algodão, visto que esse era mais fechado, e o gás precisava acelerar para atravessar o tecido. Quando se comparou esses tecidos após uma filtração e uma limpeza, ou seja, os tecidos impregnados com material particulado (Figura 4.37), se confirmou o trabalho de Rodrigues (2004), que concluiu que os tecidos de algodão e de polipropileno saturados apresentam o mesmo comportamento.

Comparando as Figuras 4.36 e 4.37, nota-se que foi o tecido de polipropileno que apresentou a maior variação entre o perfil de velocidade para o feltro virgem em relação ao feltro limpo. De forma a se comprovar essa diferença, foram levantados os perfis de velocidades para cada tecido limpo e impregnado, como apresentamos Figuras 4.38 e 4.39.

A Figura 4.38 mostra que a variação do perfil de velocidade para o algodão foi insignificante e na Figura 4.39 confirmou que a impregnação do tecido de polipropileno causou uma influência

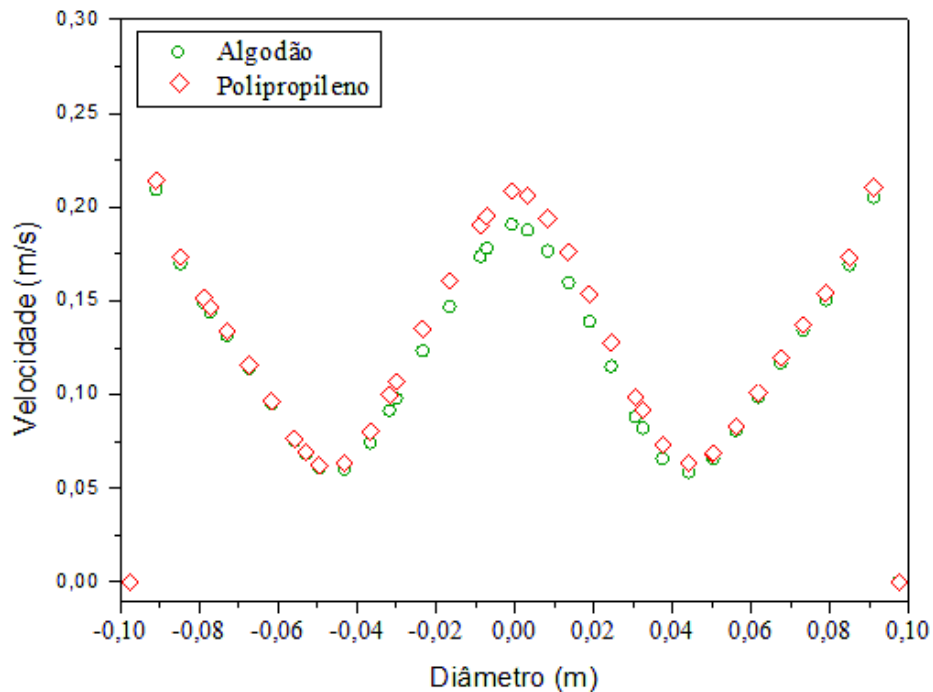


Figura 4.37: Perfis de velocidade para o algodão e o polipropileno impregnados com material particulado, na posição (4)

considerável nos perfis. Esse fato foi atribuído à obstrução dos poros discutida anteriormente.

Desse modo o tecido de polipropileno apresentou condições mais favoráveis para a filtração de gases do que o de algodão, visto que as perdas de carga apresentadas pelo tecido de algodão limpo para a velocidade de filtração estudada foram superiores as praticadas na indústria. Quanto à fluidodinâmica do gás, essa apenas sofreu influência para o tecido virgem, diminuindo consideravelmente essa diferença já no primeiro ciclo (1 filtração e uma limpeza).

No intuito de observar a influência da proximidade do meio filtrante na fluidodinâmica do gás, perfis de velocidade para os tecidos impregnados foram levantados na posição 3 (Figura 4.40).

Ao se comparar as Figuras 4.37 e 4.40, observou-se que ocorreu uma mudança de comportamento nos perfis de velocidade à jusante do filtro. Na Figura 4.40 o perfil de velocidade foi levantado mais próximo ao filtro, assim, notou-se que as menores velocidades no eixo da caixa de filtração, ou seja, na parte central do elemento filtrante, bem como nas regiões situadas entre o eixo do equipamento e a carcaça. Ao se distanciar do tecido, esse perfil foi invertido, ou seja,

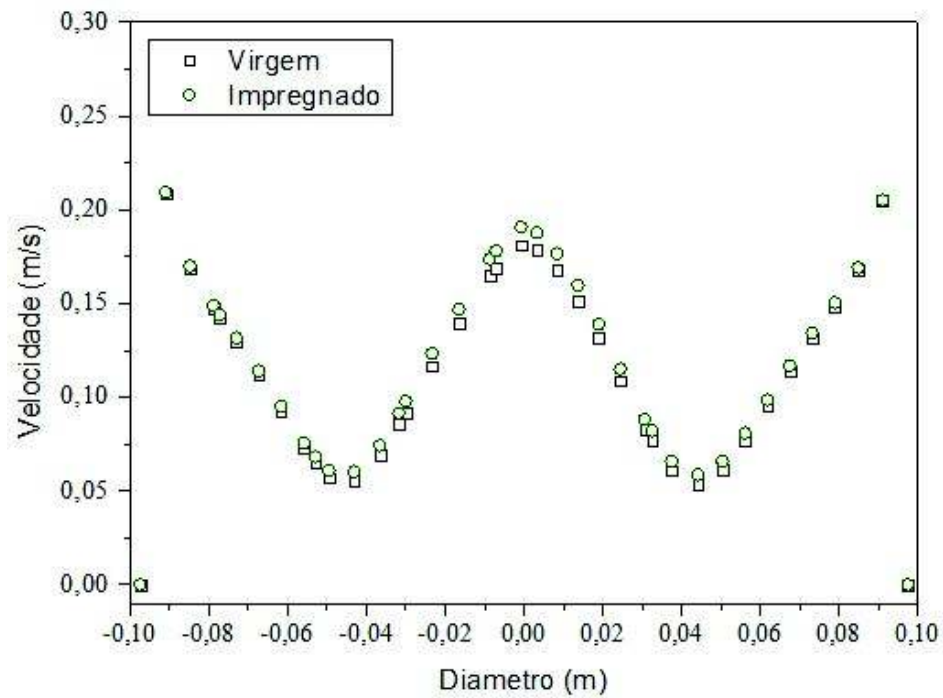


Figura 4.38: Perfis de velocidade para o tecido de algodão na posição 4.

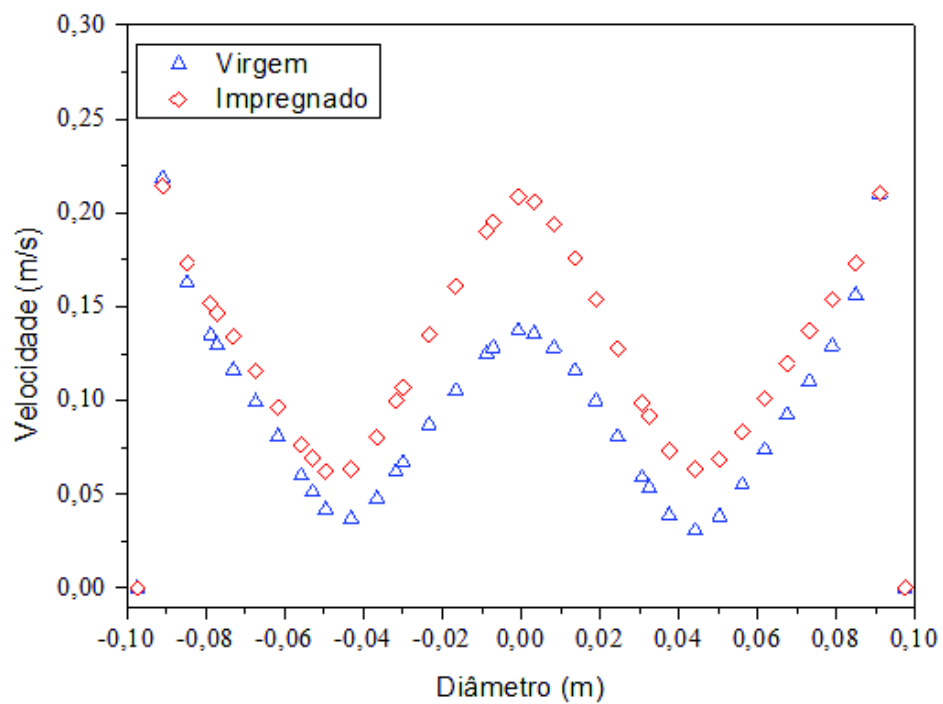


Figura 4.39: Perfis de velocidade para o feltro de polipropileno na posição 4.

os perfis de velocidades levantados a quatro centímetros do elemento filtrante, mostraram que as altas velocidades nessa posição ocorreram exatamente no centro do equipamento, e as menores velocidades entre o eixo e a carcaça.

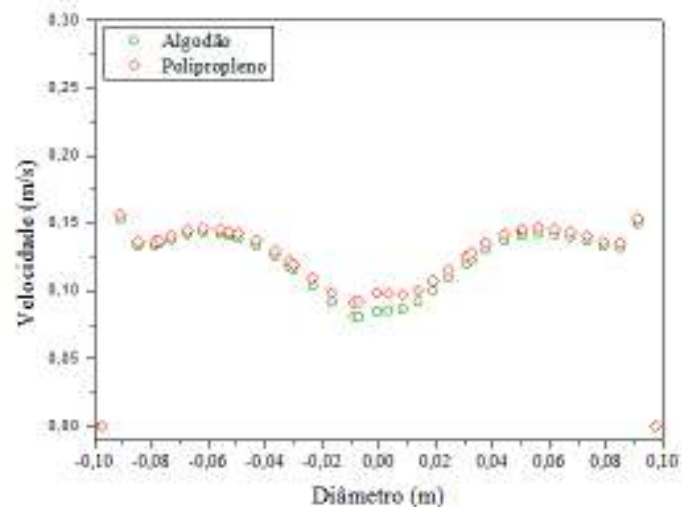


Figura 4.40: Perfil de velocidade para o polipropileno e o algodão impregnados na posição 3

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no desenvolvimento desse trabalho permitem apresentar as seguintes conclusões:

- os resultados do planejamento de experimentos apresenta um ponto de máximo para o décimo ciclo, que não é mantido para um maior número de ciclos, porque o meio filtrante virgem não caracteriza uma variável controlada. Para esses testes deveria ter utilizado o tecido já saturado, para verificar a influência das variáveis estudadas;
- a colmatção do meio filtrante foi dependente da velocidade de filtração, sendo o tempo de sua formação menor para as maiores velocidades;
- foi encontrado maior número de partículas, e uma maior profundidade, no interior do meio filtrante submetido a maiores velocidades;
- a velocidade de 15 *cm/s* apresentou maior massa coletada na filtração, entretanto essa não liberou maior quantidade de massa durante a operação de limpeza;
- a velocidade que apresentou maior massa retida (15 *cm/s*), também apresentou a maior perda de carga. Visto que as partículas remanescente da limpeza, obstruíram os poros do tecido e tenderam a aumentar a resistência do meio ao fluxo de ar;

- a porosidade medida diretamente apresentou valores cerca de 15% menor que os valores estimados pela correlação de Ergun;
- a porosidade das tortas de filtração diminuíram com o aumento da velocidade de filtração;
- a partir do ciclo 70, para as duas velocidades estudadas, a massa removida foi praticamente igual, ou seja a velocidade de filtração não mais influenciou na massa removida;
- a perda de carga residual apresentou uma variação em função do número de ciclos;
- para a velocidade de 10 cm/s , a permeabilidade e a porosidade do meio filtrante (impregnado) diminuiu com o número de ciclos;
- o meio filtrante submetidos a velocidades de filtração menores saturou para um menor número de ciclos, para a velocidade de filtração de 15 cm/s a saturação aconteceu para aproximadamente 70 ciclos;
- os ciclos de filtração apresentaram uma tendência de se tornarem cada vez menores até a saturação do tecido que aconteceu em 10 ciclos para a velocidade de 5 cm/s e 70 ciclos para a velocidade de 15 cm/s , fato esse que ocorreu devido ao aumento da perda de carga inicial de cada ciclo (perda de carga residual);
- a velocidade de filtração teve maior influência na fluidodinâmica do gás que o número de ciclos;
- a diferença de pressão ao percolar o meio filtrante foi diretamente proporcional ao valor da velocidade de filtração;
- as maiores velocidades de filtração causaram maior recirculação de gás à montante do meio filtrante;
- a jusante do meio filtrante independente da velocidade de filtração, o fluido apresentou a mesma dinâmica de distribuição de velocidades;
- O tecido de polipropileno apresentou condições mais favoráveis para a filtração de gases que o algodão, visto que as perdas de carga apresentadas pelo tecido de algodão limpo, para a velocidade de filtração estudada, são superiores as praticadas na indústria;

5.2 SUGESTÕES PARA Trabalhos Futuros

- Realizar o Planejamento de Experimentos para o tecido saturado;
- Calcular a porosidade pelo método direto para os cem ciclos de filtração;
- Calcular a permeabilidade diretamente para os ciclos de filtração;
- Fazer a simulação em CFD colocando partículas;
- Realizar estudo da influência do número de ciclos para meios filtrantes e material particulado diferente.

Referências Bibliográficas

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

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

AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. "cake formation in fabric filtration of gases". *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 35, n. 10, p. 3673 – 3679, 1996.

ALLEN, T. "*Particle size measurement*". [S.l.]: 5, 1997.

ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES. "*Verificação de Meios de Filtros para Filtros Purificáveis: Verificação Padrão para Avaliação Comparativa de Filtros Purificáveis (Instruções VDI)*". [S.l.], 2003.

AZEVEDO, S. G. R. "*Estudo da Influência do Formato das Partículas na Operação de Filtração de Gases*". Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2009.

BAKER, J. "no binder required to create composite media". *Filtration and Separation*, p. 26 – 28, 2001.

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

- BILLINGS, C.; WILDER, J. *"Handbook of fabric filter"*. [S.l.]: NAPCA Publication PB 200, 1970.
- BOSKOVIC, L. et al. "influence of particle shape on filtration processes". *Aerosol Science and Technology*, v. 39, p. 1184 – 1190, 2005.
- BOX, G.; HUNTER, W.; HUNTER, T. *"Statistics for Experimenters"*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1978.
- BROWN, R.; WAKE, D. "loading filters with monodisperse aerosols: microscopic treatment". *Journal of Aerosol Science*, v. 2, p. 227–234, 1999.
- BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G. *"Aplicações em Sistemas Particulados"*. [S.l.]: Suprema, 2009.
- CALLÉ, S. et al. "descriptions of the clogging and cleaning cycles of filter media". 2002.
- CAVASSENO, V. *"Industrial Air Pollution Engineering"*. [S.l.: s.n.], 1980.
- CERON, L. P. *"Têxteis para a Construção de Elementos Filtrantes"*. www.rennertextil.com.br, agosto 2009.
- CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. Cake formation and growth in cake filtration. *Powder Technology*, v. 192, p. 217–224, 2009.
- CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. "influence of filtration superficial velocity on cake compression and cake formation". *Chemical Engineering and Processing*, v. 48, p. 988 – 996, 2009.
- CHENG, Y.; TSAI, C. "factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration". *Journal of Aerosol Science and Technology*, v. 29, p. 315–328, 1998.
- CHEREMESINOFF, P.; YOUNG, R. *"Air pollution control and design handbook, part I"*. [S.l.: s.n.], 1977. 607 p.
- CHOI, J.-H. et al. "experimental investigation into compression properties of integrated coal gasification combined cycle fly ashes on a ceramic filter". *Korean Journal of Chemical Engineering*, v. 21, p. 726 – 732, 2004.

- CHOI, J. H.; HA, J. S.; JANG, H. J. "compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter". *Powder Technology*, v. 140, p. 106 – 115, 2004.
- CLARK, G. "design considerations of needlefelts used for air filtration applications". *The Journal of the Filtration Society*, v. 01, 2001.
- COURY, J. R. "*Electrostatic Effects in Granular Bed Filtration of Gases*". Tese (Doutorado) — Cambridge University, 1983.
- DAVIS, W.; BUONICORE, A. "*Air Pollution Engineering Manual*". [S.l.], 1992.
- DENNIS, R.; KLEMM, H. "modeling concept for pulse-jet filtration". *Filtration and Separation*, v. 30, n. 1, p. 38–43, 1980.
- DENNIS, R.; KLEMM, H. "recent concepts describing fabric filter behaviour". *Filtration and Separation*, p. 22, 1982.
- DICKENSON, C. "*Filters and Filtration Handbook*". [S.l.]: 3, 1994.
- DITTLER, A.; KASPER, G. "simulation of operational behaviour of patchily regenerated, rigid gas cleaning filter media". *CHEMICAL ENGINEERING PROCESSING*, v. 38, p. 321–327, 1999.
- DONOVAN, R. P. "*Fabric Filtration for Combustion Sources*". [S.l.: s.n.], 1985.
- DULLIEN, F. A. L. "*Introduction to Industrial Gas Cleaning*". [S.l.]: Academic Press, 1989.
- ENDO, Y.; ALONSO, M. "physical meaning of specific cake resistance and effects of cake properties in compressible cake filtration". *Filtration and Separation*, p. 43–46, 2001.
- ENDO, Y.; CHEN, D. R.; PUI, D. Y. H. "effect of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading and air filters". *Powder Technology*, v. 98, 1998.
- FARGNOLI, A. G. "*ESTUDO DA COMPRESSIBILIDADE DE TORTAS DE FILTRAÇÃO DE GASES EM FILTROS DE TECIDO*". Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2010.

- FELIPE, C. "*Influência das variáveis de processo na qualidade de sementes de soja submetidas a secagem em leito deslizante e escoamentos concorrentes*". Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- FORTUNA, A. D. O. "*Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos*". [S.l.]: pRO tEMPORE, 2000.
- GEANKOPLIS, C. "*Processos de Transporte Y Operaciones Unitarias*". 3^a. ed. [S.l.]: University of Minnesota, 1998.
- GERBAT, D. "powder processing - the overall view". *Principles of powder technology.*, p. 1 – 7, 1990.
- HARDMAN, E. "filter media selection, science or black art?". *The Journal of the Filtration Society*, v. 01, 2001.
- HÖFLINGER, W.; STÖCKLMAYER, C.; HALCKL, A. "model calculation of the compression behaviour of dust filter cakes". *Filtration and Separation*, p. 807 – 811, 1994.
- HINDS, W. C. "aerosol technology: Properties, behavior and measurement of airborne particles". *Wiley Interscience*, 1999.
- INNOCENTINI, M. D. et al. "permeability optimization and performance evaluation of hot aerosol filters made using foam incorporated alumina suspension". *Journal of Hazardous Materials*, v. 162, p. 212 – 221, 2009.
- ITO, L. X. "*Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases*". Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2002.
- JAGANATHAN, S.; TAFRESHI, H. V.; POURDEYHIMI, B. "arealistic approach for modeling permeability of fibrous media: 3-d imaging coupled with cfd simulation". *Chemical Engineering Science*, v. 63, p. 244 – 252, 2008.
- JAPUNTICH, D.; STENHOUSE, J.; LIU, Y. "effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous filter". *Journal of Aerosol Science*, v. 28, p. 147–158, 1997.

- JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T.; LIU, B. Y. H. "experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters". *Journal of Aerosol Science*, v. 25, p. 385–393, 1994.
- JEON, K.; JUNG, Y. "a simulation study on the compression behavior of dust cakes". *Powder Technology*, v. 141, p. 1–11, 2004.
- KANAOKA, C.; HIRAGI, S. "pressure drop of air filter with dust load". *Journal of Aerosol Science*, v. 21, p. 127–137, 1990.
- KAVOURAS, A.; KRAMMER, G. "distributions of age, thickness and gas velocity in the cake of jet pulsed filters - application and validation of generations filter model". *Chemical Engineering Science*, v. 58, p. 223–238, 2003.
- KIM, J.-H. et al. "temperature effect on the pressure drop across the cake of coal gasification ash formed on a ceramic filter". *Powder Technology*, v. 181, p. 67 – 73, 2008.
- KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. "dust cake detachment from gas filters". *Powder Technology*, v. 86, p. 21 – 29, 1996.
- LEITH, D.; ALLEN, R. W. "dust filtration by fabric filters". *Progress in Filtration*, v. 4, p. 1–57, 1986.
- LO, L. M. et al. "numerical study of pleated fabric cartridges during pulse-jet cleaning". *Powder Technology*, v. 198, p. 75 – 81, 2010.
- LORA, E. E. S. "*Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte*". [S.l.]: 2ª, 2002.
- LUCAS, R. D. "*Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos*". Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2000.
- MARTINS, J. C. "*Estudo da deposição de Material Particulado no meio Filtrante durante a filtração gás sólido*". Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2001.

- MATTESON, M.; ORR, C. "*Filtration: Principles and Practices*". [S.l.]: 2, 1987.
- MAUSCHITZ, G.; KOSCHUTNIG, W.; HOFLINGER, W. "the influence of filter regeneration on the internal particle rearrangement of nonwoves for cleanable dust filters". *INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING*, p. 16, 2004.
- MAUSCHITZ, G.; KOSCHUTNIG, W.; HOFLINGER, W. "analysis of the clogging behavior of thermally finished nonwoven dust filter media by optically detected porosity parameters". In: *Anais FILTECH, VII.*, [S.l.: s.n.], 2005. p. p.II-20 a II-28.
- MCKENNA, J.; FURLONG, D. Fabri filters. *Air & Waste Management Association*, p. 114 –132, 1992.
- MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K. "the influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabrick filters". *Filtration and Separation*, v. 33, p. 339 – 346, 1996.
- MYCOCK, J. C.; MCKENNA, J. D.; THEODORE, L. "*Handbook of air Pollution Control Engineering and Technology*". [S.l.]: 1, 1995.
- NEGRINI, V. S. et al. "determinação da porosidade de tortas de filtração de gases". *Anais XXVI ENEMP*, v. 1, p. 193 – 200, 1998.
- NETO, O. G. D. S. "*Estudo da Porosidade de Tortas em Filtros de Manga Operando na Filtração de Gases*". Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2002.
- OSÓRIO, V. M. "*Comportamento da filtração de gases em meios filtrantes de celulose*". Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2006.
- PAYATAKES, A. C. "model of transient aerosol particles deposition in fibrous media with dendritic pattern". *AIChE Journal*, v.23, 1977.
- PORCIÚNCULA, C. B. D. "*Simulação Fluidodinâmica Computacional de Processos de Separação por Membranas*". Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2007.
- POWELL, J. "surface filtration:the way forward?". *Filtration and Separation*, p. 134 –136, 1998.

- QIAN, F.; WANG, H. "study of the filtration performance of a plain wave fabric filter using response surface methodology". *Journal of Hazardous Materials*, p. 559 – 568, 2009.
- RAWLE, A. *Basic principles of particle size analysis*. [S.l.], 2005.
- RODRIGUES, A. C. M. "*Estudo da Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases em Filtros de Tecidos de Polipropileno e de Algodão*". Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2004.
- RODRIGUES, K. B. "*Filtração de Gas: Estudo da Decomposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes*". Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2006.
- ROTHWELL, E. "fabric dust filtration: principles and practice". *Filtration and Separation*., p. 471–475, 1980.
- ROTHWELL, E. "changing patterns in dust filtration research". *Filtration and Separation*, p. 36 – 41, 1989.
- SANTOS, E. L. *Avaliação do "Conceito Bolha" Como Critério de Compensação Ambiental em Atividades Poluidoras de Ar Atmosférico - Estudos de Caso no Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2004.
- SCHIMIDT, E.; LÖFFLER, F. "preparation of dust cakes for microscopic examination". *Powder Technology*, v. 60, p. 173 – 177, 1990.
- SCHIMIDT, E.; LÖFFLER, F. "the analysis of dust cake structures". *Part.Syst. Charact.*, v. 8, p. 105–109, 1991.
- SCHMIDT, E. Simulation of the 3- dimension dust cake build-up means of single particle tracing. *Anais do PARTEC*, v. 1, p. 255 – 264, 1995.
- SEVILLE, J. et al. Patchy cleaning of rigid gas filters. *Chemical Engineering Science*, v. 52, p. 153–164, 1997.
- SILVA, C. R. N. et al. "influence of gás velocity on cake formation and detachment". *Powder Technology*, v. 101, p. 165 – 172, 1999.

- SILVA, G. et al. Effect of process parameters on cake formation and removal during gas-solid filtration in fabric filters. *World Filtration congress*, v. 1, p. 245–248, 2000.
- SONG, C.; PARK, H.; LEE, K. "experimental study of filter clogging with monodisperse psl particles". *Powder Technology*, v. 163, n. 3, p. 152–159, 2006.
- STRAUSS, W. *Industrial gas cleaning*. [S.l.]: Pergamon Press, Oxford, 1975.
- SVAROVSKY, L. "solid-gas separation". *Scientific Publishing Company*, 1981.
- TANABE, E. H. *Estudo do Comportamento da Deposição das Partículas de Diferentes Meios Filtrantes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2008.
- TARDOS, G.; ABUAF, N.; GUTFINGER, C. "dust deposition in granular bed filters theories and experiments". *Journal of Air Pollution Control Association*, v. 28, p. 354, 1978.
- THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. "air pollution control equipment - particulates". *CRC Press*, v. 1, 1988.
- THOMAS, D. et al. "clogging of fibrous filter by solid aerosol particles. experimental and modeling study". *Chemical Engineering Science*, v. 56, p. 3549 – 3561, 2001.
- TIENI, R. F. "*Filtração de Gases: Estudo do Fenômeno da Limpeza por Blocos*". Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2005.
- TOGNETTI, E. R. "*Influência das Condições Operacionais na Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases*". Dissertação (Mestrado) — Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 2007.
- TUNG, K. L. et al. "effect of calendaring of filter cloth on transient characteristics of cake filtration". *Separation Purification Technology*, v. 45, p. 1 –15, 2005.
- VENTEC AMBIENTAL EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES LTDA. *Manual Técnico de Instalação, Operação e Manutenção. Filtro de Mangas*. www.ventec.com.br, novembro 2008.
- WAKEMAN, E. R. "the influence of particle properties on filtration". *Separation Purification Technology*, v. 58, p. 234 – 241, 2007.

WALSH, D. C. et al. "the effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance". *Journal of Aerosol Science*, v. 27, p. 617 – 618, 1996.

WANG, Q. et al. "anote on permeability simulation of multifilamentwoven fabrics". *chemical Engineering Science*, v. 61, p. 8085 – 8088, 2006.

WILDER, J.; BILLINGS, C. "performace of fabric filtrations systems". *Anais Second International Clean Air Congress.*, 1970.