



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



ESTUDO SOBRE O EFEITO DE VIBRAÇÕES AXIAIS SOBRE A FORMAÇÃO E
REMOÇÃO DE TORTAS DE FILTRAÇÃO GÁS-SÓLIDOS

Uberlândia - MG

2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



**ESTUDO SOBRE O EFEITO DE VIBRAÇÕES AXIAIS SOBRE A FORMAÇÃO E
REMOÇÃO DE TORTAS DE FILTRAÇÃO GÁS-SÓLIDOS**

DEIVID MARQUES NUNES

Tese de doutorado submetida 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 na área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia – MG

2017

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

N972e
2017 Nunes, Deivid Marques, 1987-
 Estudo sobre o efeito de vibrações axiais sobre a formação e
 remoção de tortas de filtração gás-sólidos / Deivid Marques Nunes. -
 2017.
 118 f. : il.


 Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
 de Pós-Graduação em Engenharia Química.
 Inclui bibliografia.

 1. Engenharia química - Teses. 2. Gases - Purificação - Teses. 3.
 Filtros e filtração - Teses. I. Damasceno, João Jorge Ribeiro. II.
 Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
 Engenharia Química. III. Título.


CDU: 66.0

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 16 DE JANEIRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA



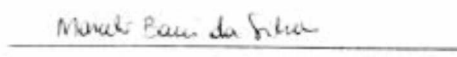
Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador (PPG-EQ/UFU)



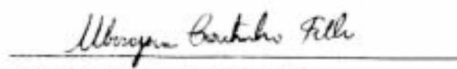
Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira de Lima
(UNIUBE)



Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca
(FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva
(UFTM)



Prof. Dr. Ubirajara Coutinho Filho
(FEQUI/UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus por todas as bênçãos que Ele proporcionou na minha vida e em toda a minha família. Agradeço pela oportunidade de prosseguir meus estudos, superando todos os obstáculos com muita fé, amor e perseverança e de reconhecer que o Seu amor é grandioso.

Agradeço à minha mãe Shirley e meus irmãos Diego e Íngrid por estarem comigo nessa caminhada juntos e sempre me apoiarem e me abençoarem todos os dias para que eu pudesse concretizar essa etapa em nossa vida, tornando os meus dias mais agradáveis com uma simples palavra de incentivo, força e do orgulho nos olhos refletidos. Amo vocês!

Agradeço aos meus avós Zé Caifaz e Cirlene que mesmo de longe torceram por mim e acreditaram que era possível fechar esse ciclo, em especial, agradeço às palavras do meu avô que não se encontra em matéria entre nós, mas em espírito e torcendo sempre para o nosso sucesso. Agradeço também às minhas tias Ágda e Tânia pelas orações.

Agradeço à Marina Araújo Vieira pelo apoio, cumplicidade e dedicação no período em que estivemos juntos. Sua presença foi muito significativa e importante para a realização desse trabalho. Você faz parte desse sonho alcançado.

Agradeço ao professor Damasceno por todas as oportunidades de crescimento que me foram orientadas e pelo cuidado e amizade que teve com as minhas diversas dificuldades em desenvolver e dar seguimento às atividades da pesquisa e, principalmente, pela compreensão dos momentos difíceis que muitas vezes passei internas e externas à pesquisa. Sou muito grato por tudo que fez por nós, por toda a consideração que teve comigo e de sempre querer minha evolução, meu bem-estar pessoal e profissional. O senhor representa muito para mim e é um modelo de pessoa e de profissional que respeitarei. Deus abençoe e ilumine o senhor e família sempre! Muito obrigado!

Agradeço ao professor Fábio de Oliveira Arouca que também o tenho como modelo de pessoa e de profissional. Sou muito grato por todo o apoio, amizade e dedicação a mim prestados e quero dizer que foi fundamental para o meu crescimento e na concretização desse sonho, sempre acreditando em mim e me apoiando nas mais difíceis circunstâncias da vida acadêmica e pessoal. O senhor representa muito para mim. Deus abençoe e ilumine o senhor e sua família sempre! Muito obrigado!

Agradeço aos professores da banca de avaliação desse trabalho: Euclides Antônio Pereira de Lima, Marcelo Bacci da Silva e Ubirajara Coutinho Filho por estarem presente e acrescentarem e contribuírem para a melhoria desse trabalho.

Agradeço aos colegas da pós-graduação do Laboratório de Separação: Adriana Quemelli, Aline Arouca, Bruno Arantes, Eduarda Matos, Flávia Marques, Hélio Jr., Maurielem Dalcin, Nara Brandão pela ajuda na realização e dos experimentos e do apoio na resolução dos problemas, trocas de ideias que ajudarão nas tomadas de decisão do projeto.

Agradeço à dedicação dos meus alunos de Iniciação Científica Allan Effgen, Bruno César, Gabrielle Mosken, Leonardo Ives, Lucas Camargos e João Mauro pela dedicação à pesquisa e pela boa convivência que tivemos durante esses dois anos e meio, com muito respeito, amizade e responsabilidade.

Agradeço aos colegas da Unidade de Pesquisa, vulgo “Postinho” pela companhia e ajuda na realização dos experimentos. Aos funcionários Ana Cládia, Dona Olésia, Ueslei e Claudair e colegas Maria Aparecida, Roseli e Izadora pela excelente e prazerosa companhia e disposição em ajudar sempre que eram solicitados.

Agradeço ao professor Carlos Ataíde pela disponibilização do Laboratório de Caracterização de materiais particulados e ao Joaquim Moroni e José Luís pelo tempo cedido para a realização das análises dessa caracterização. Ao Moroni pelo empenho na automação da unidade experimental com muito profissionalismo e ideias bastante interessantes.

Agradeço ao funcionário Rafael pela realização das imagens dos materiais particulados e do meio filtrante no microscópio eletrônico de varredura (MEV). Ao pessoal da oficina mecânica da FEQUI, o senhor Humberto e o Ulisses pela prontidão dos serviços prestados e pela atenção, dedicação e cuidado com o que era solicitado.

Agradeço ao professor Humberto pela convivência na Unidade de Pesquisa e no auxílio na programação das correlações encontradas na literatura para os cálculos de porosidades das tortas, além da preocupação com o desenvolvimento dos experimentos.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química pela oportunidade realizar os estudos de Mestrado e Doutorado. Agradeço a todos os funcionários da secretaria da pós-graduação, em especial, à Cecília pela torcida, carinho e respeito que sempre teve comigo.

Agradeço à CAPES, à CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro para a realização desse trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Goiás, Regional Catalão – GO pela liberação parcial para a finalização dos testes experimentais e escrita da tese de doutorado.

Estendo meus agradecimentos às pessoas que participaram e contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

"Que Deus coloque em seu coração a certeza de que tudo dará certo, pois é Deus quem está no controle de tudo mesmo você não vendo, Ele está agindo, e, na verdade, você não precisa ver, precisa crer. Confie, descanse e espere. O melhor está por vir!"

Pe. Fábio de Melo

*“Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso!
Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o
seu Deus, estará com você por onde você andar.”*

(Josué 1:9)

SUMÁRIO

Índice de Figuras	i
Índice de Tabelas	v
Índice de Símbolos	vii
Resumo	iv
Abstract	v
1 Introdução e objetivos	1
2 Revisão bibliográfica	4
2.1 A Filtração de gases	4
2.2 Os mecanismos de captura de partículas	5
2.3 A formação das tortas de filtração	10
2.4 As curvas de filtração	14
2.5 Os mecanismos de limpeza	17
2.6 O meio filtrante	20
2.7 Variáveis importantes na operação de filtração	24
2.7.1 Queda de pressão no sistema de filtração	25
2.7.2 Permeabilidade do meio filtrante	26
2.7.3 Velocidade superficial de filtração	26
2.7.4 Porosidade da torta de filtração	27
2.7.5 Forças de adesão	31

2.7.6 Metodologia de Seville et al. (1989)	33
2.8 Trabalhos encontrados na literatura sobre filtração de gases	35
3. Materiais e métodos	40
3.1 Unidade experimental	41
3.2 Sistema de alimentação de pó	42
3.3 Caixa de filtração	43
3.4 Direcionamento do escoamento	43
3.5 Medição de vazão e queda de pressão	45
3.6 Medição de umidade	45
3.7 Outros itens	46
3.8 Materiais particulados	46
3.9 Meio filtrante	46
3.10 Calibração do gerador de pó	48
3.11 Metodologia experimental	48
3.12 Metodologia para determinação da força de adesão – Sevillet et al. (1989)	51
3.13 Ciclos de filtração	52
4. Resultados e Discussões	54
4.1 Caracterização dos materiais particulados	54
4.1.1 Rocha fosfática moída	56
4.1.2 Talco puro	57
4.1.3 Polvilho doce	59
4.2 Ensaio de filtração de gases – rocha moída	60

4.2.1 Forças de adesão	74
4.3 Ensaios de filtração de gases – polvilho doce	78
4.3.1 Forças de adesão	90
4.4 Ensaios de filtração de gases – talco puro	93
4.5 Ciclos de filtração	98
5 Conclusões e sugestões futuras	103
Referências bibliográficas	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Esquema de operação de filtração de gases	4
Figura 2.2	Mecanismo de captura de partículas	5
Figura 2.3	Mecanismo de captura de partículas em relação ao tamanho da partícula	9
Figura 2.4	Filtração interna ou de profundidade	10
Figura 2.5	Superposição dos dendritos na superfície dos tecidos	12
Figura 2.6	Filtração superficial de filtração	12
Figura 2.7	Queda de pressão em função da massa de pó acumulada	12
Figura 2.8	Determinação do ponto de colmatção	13
Figura 2.9	Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração	14
Figura 2.10	Comportamento ideal dos ciclos de filtração	15
Figura 2.11	Comportamento real dos ciclos de filtração	15
Figura 2.12	Comportamento real dos ciclos com regeneração incompleta	16
Figura 2.13	Mecanismos de limpeza por fluxo de ar reverso	17
Figura 2.14	Mecanismos de limpeza por pulso de ar	18
Figura 2.15	Mecanismos de limpeza por vibração mecânica	19
Figura 2.16	Microscopia eletrônica de varredura no tecido	21
Figura 2.17	Microscopia eletrônica de varredura no tecido não trançado	21
Figura 2.18	Método Seville et al., (1989)	34
Figura 3.1	Diagrama esquemático da unidade experimental	40
Figura 3.2	Estrutura superficial do meio filtrante acrílico	47
Figura 4.1	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da (a) rocha fosfática, (b) talco puro e (c) polvilho doce.	54

Figura 4.2	Distribuição granulométrica média da rocha fosfática moída nas tortas de filtração	55
Figura 4.3	Distribuição granulométrica média do talco puro nas tortas de filtração	57
Figura 4.4	Distribuição granulométrica média do polvilho doce nas tortas de filtração....	58
Figura 4.5.	Queda de pressão em função do tempo de filtração para a faixa baixa em comparação ao sistema estático	61
Figura 4.6.	Massa de pó acumula por unidade de área em função da queda de pressão para a faixa de frequência de vibração baixa.....	63
Figura 4.7.	Massa de pó acumula por unidade de área em função da queda de pressão para a faixa de frequência de vibração intermediária.....	64
Figura 4.8	Massa de pó acumulada por unidade de área em função da queda de pressão para as faixas de frequências de vibração alta	65
Figura 4.9:	Arraste em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências 12, 17 e 18 Hz em comparação com o sistema estático; rocha moída (0 Hz).....	69
Figura 4.10	Espessura da torta em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências de 12, 17 e 18 Hz em comparação ao sistema estático	70
Figura 4.11	Resistência específica da torta em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências 12, 17 e 18 Hz em comparação com o sistema estático	72
Figura 4.12	Porosidade da torta em função da massa de pó acumulada por unidade área para as frequências 12, 177 e 18 Hz em comparação com o sistema estático	74
Figura 4.13	Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida para os sistemas com vibração e sistema estático;rocha moída.....	75
Figura 4.14	Queda de pressão na limpeza em função da massa retida para os sistemas estático e com vibrações	76
Figura 4.15	Queda de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza para os sistemas estático e com vibrações.....	77

Figura 4.16	Tempo de filtração para os sistemas independentes e intermitentes em comparação ao sistema estático; polvilho doce	79
Figura 4.17	Queda de pressão em relação à massa de pó acumulada por unidade de área para os sistemas com vibrações independentes e intermitentes em comparação ao sistema estático; polvilho doce	80
Figura 4.18	Arraste do meio filtrante e porosidade das tortas de filtração em função da massa acumulada por unidade de área de polvilho doce para o sistema independente e intermitente em comparação ao sistema estático	83
Figura 4.19	Espessura e porosidade das tortas de filtração de polvilho doce em função da massa acumulada por unidade de área para os sistemas estático e com vibrações independente e intermitente	84
Figura 4.20	Resistência específica e porosidade da torta em função da carga mássica de pó para o sistema estático e o sistema com vibração independente.....	87
Figura 4.21	Porosidade das tortas de filtração de polvilho em função da massa acumulada por unidade de área para os sistemas estático e com vibração independente ...	88
Figura 4.22	Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida para os sistemas com vibração e estático;polvilho doce.....	89
Figura 4.23	Queda de pressão na limpeza em função da fração de massa retida para os sistemas com vibrações e estático;polvilho doce.....	90
Figura 4.24	Queda de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza para os sistemas com vibração e estático	91
Figura 4.25	Tempo de filtração para o sistema estático em comparação aos sistemas independentes e intermitentes;talco puro.....	93
Figura 4.26	Massa de pó acumulada por unidade de área para os sistemas com vibrações independentes e intermitentes em comparação ao sistema estático; talco puro....	95
Figura 4.27	Massa acumulada por unidade de área entre os sistemas estático e com vibração mecânica para os 5 ciclos; polviho doce.....	97
Figura 4.28	Comparação da massa acumulada por unidade de área entre os sistemas estático e com vibração mecânica para os 5 ciclos; polviho doce	98
Figura 4.29	Massa de pó removida por unidade de área entre os sistemas estático e com vibração mecânica para os 5 ciclos; polvilho doce.....	99

Figura 4.30	Massa de pó retida por unidade de área entre os sistemas estático e com vibração mecânica para os 5 ciclos; polvilho doce.....	99
Figura 4.31	Queda de pressão residual para os 5 ciclos de filtração para os sistemas estático e com vibração mecânica; polvilho doce	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Características dos mecanismos de limpeza	19
Tabela 2.2	Características dos meios filtrantes.....	22
Tabela 2.3	Parâmetros de projeto para filtração de gases.....	30
Tabela 2.4	Valores de distância efetiva “a” entre as partículas e substratos	31
Tabela 3.1	Características especificações do meio filtrante	46
Tabela 3.2	Valores de velocidades utilizadas nas operações de filtração e limpeza..	50
Tabela 4.1	Caracterização da rocha fosfática moída.....	56
Tabela 4.2	Caracterização do talco puro.....	58
Tabela 4.3	Caracterização do polvilho doce.....	59
Tabela 4.4	Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para as faixas de frequências baixas.....	67
Tabela 4.5	Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para as faixas de frequências intermediárias.....	68
Tabela 4.6	Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para as faixas de frequências médias.....	68
Tabela 4.7	Teste de hipóteses para o arraste do meio filtrante para os sistemas estático e com vibração.....	70
Tabela 4.8	Teste de hipótese para as espessuras das tortas para os sistemas estático e com vibração.....	71
Tabela 4.9	Teste de hipótese para a resistência específica da torta para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	72
Tabela 4.10	Teste de hipótese para a porosidade da torta para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	73
Tabela 4.11	Valores da resistência específica do filtro, tensão de remoção e força de adesão para o sistema estático e com efeito de vibração.....	78

Tabela 4.12	Teste de hipótese para as massas das tortas para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	82
Tabela 4.13	Teste de hipótese para o arraste do meio filtrante para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	84
Tabela 4.14	Teste de hipótese para as espessuras das tortas para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	85
Tabela 4.15	Teste de hipótese para as resistências específicas das tortas para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	86
Tabela 4.16	Teste de hipótese para as porosidades das tortas para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	87
Tabela 4.17	Forças de adesão encontradas para o sistema com e sem efeito de vibração mecânica; polvilho doce.....	94
Tabela 4.18	Teste de hipótese para as massas das tortas para os sistemas estático e com vibração mecânica.....	96

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

A	Área superficial de filtração.....	[L ⁻²]
a	Distância de separação efetiva.....	[L]
C _r	Fator de correção.....	[-]
C _d	Fator de correção para efeito de escorregamento para difusão browniana.....	[-]
d _f	Diâmetro das fibras.....	[L]
d _p	Diâmetro das partículas.....	[L]
d ₁	Diâmetro da partícula 1.....	[L]
d ₂	Diâmetro da partícula 2.....	[L]
C	Fator de escorregamento de <i>Cunningham</i>	[L]
F _w	Forças de Van der Waals.....	[MLT ⁻²]
F _c	Força de adesão.....	[MLT ⁻²]
F	Força média que atua nos pontos de contato com as partículas.....	[MLT ⁻²]
f	Frequência de vibração mecânica.....	[Hz]
g	Aceleração da gravidade.....	[LT ⁻²]
H	Constante de <i>Hamaker</i>	[ML ² T ⁻²]
k ₁	Resistência específica do meio filtrante.....	[ML ⁻² T ⁻²]
k ₂	Resistência específica da torta de filtração.....	[T ⁻¹]
K _{ck}	Constante empírica.....	[-]
K _u	Fator de Kubawara.....	[-]
K _{nC}	Número de Knudsen relativo ao coletor.....	[-]

K_M	Parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem [-]
K_1	Coeficiente de permeabilidade darciana [L^2]
K_2	Coeficiente de permeabilidade não darciana [L]
n	Parâmetro estimado pelo <i>RRB</i> [-]
L_m	Espessura do meio filtrante [L]
M_1	Peso do saco descartável de aspirador de pó [M]
M_2	Massa de pó coletada equivalente a uma rotação do prato de alimentação [M]
M_t	Massa da torta de filtração [M]
NR	Parâmetro de interceptação [-]
Pe	Número de Peclet [-]
St	Número de Stokes [-]
Q	Vazão mássica [MT^{-1}]
q	Carga da partícula [C]
t	Tempo de filtração [T]
t_i	Tempo de filtração correspondente ao ponto calculado [T]
t_T	Tempo total de filtração [T]
T	Temperatura [K]
t	Tempo de filtração [T]
V_f	Velocidade superficial de filtração [LT^{-1}]
v_t	Velocidade terminal da partícula [LT^{-1}]
W	Massa de pó depositada por unidade de área [ML^{-2}]
W_R	Massa de pó retida no filtro após determinada velocidade de limpeza [ML^{-2}]

t	Tempo de filtração [T]
ε	Porosidade..... [-]
ε_c	Constante dielétrica da partícula [-]
ε_f	Constante dielétrica do fluido [-]
γ	Coefficiente de polarização do coletor..... [-]
μ_g	Viscosidade do gás..... [ML ⁻¹ T ⁻¹]
ρ_p	Densidade da partícula [ML ⁻³]
ρ_g	Densidade do gás [ML ⁻³]
λ	Percurso livre médio das partículas [-]
ΔP_T	Queda de pressão total [ML ⁻¹ T ⁻²]
ΔP_m	Queda de pressão no meio filtrante..... [ML ⁻¹ T ⁻²]
ΔP_{cL}	Queda de pressão nas tortas [ML ⁻¹ T ⁻²]
ΔP_L	Queda de pressão de limpeza..... [ML ⁻¹ T ⁻²]
ΔP	Queda de pressão [ML ⁻¹ T ⁻²]
n	Número médio de contatos partícula-partícula por unidade de área..... [ML ⁻¹ T ⁻²]
η_T	Eficiência global de coleta [%]
η_G	Eficiência de coleta gravitacional [%]
η_I	Eficiência de coleta impactação inercial [%]

η_{ID}	Eficiência de coleta interceptação direta..... [%]
η_D	Eficiência de coleta difusional [%]
η_e	Eficiência de coleta elostrática..... [%]
σ^*	Tensão normal..... [ML ⁻¹ T ⁻²]
σ_{R-R}^*	Tensão de ruptura do aglomerado..... [ML ⁻¹ T ⁻²]
γ	Fração de massa retida [-]

RESUMO

Com o intuito de tornar a operação de filtração de gases mais eficiente, o objetivo desse trabalho foi adaptar um sistema de filtração com motor vibrador acoplado axial ao fluxo gasoso que possibilitasse o desprendimento da torta de filtração sem a necessidade de parar a operação de filtração, além de avaliar a influências das frequências de vibração mecânica na formação das tortas quanto às forças de arraste no meio filtrante, espessuras das tortas, resistências específicas das tortas, porosidades das tortas em comparação com o sistema ausente de vibração. Foram utilizados como materiais particulados o polvilho doce, o talco puro e a rocha fosfática moída, a fim de verificar a influência da vibração em materiais particulados com diferentes morfologias e distribuição granulométrica. A velocidade de filtração superficial do fluxo gasoso foi de 10 cm/s, a uma vazão mássica de 0,183 g/s e queda de pressão máxima estabelecida de 10000 Pa. As porosidades das tortas de filtração foram determinadas por correlações encontradas na literatura. Os resultados mostraram que para as frequências de vibrações mecânicas de 12, 17 e 18 Hz influenciaram na estrutura da torta e em sua remoção para o material particulado rocha fosfática moída, cuja circularidade era de 0,60, causando a formação de tortas menos espessas, mais resistentes e menos porosas quando comparadas ao sistema estático. As forças de adesão desse material também foram maiores para as frequências de vibração que o sistema estático. Concluiu-se que as vibrações mecânicas causaram um empacotamento mais denso das partículas de rocha moída no meio filtrante. Já para o material particulado, o talco puro, cuja circularidade era de 0,67, as vibrações mecânicas tanto para o sistema independente quanto ao sistema intermitente proporcionam comportamentos semelhantes ao sistema estático, não sendo viável sua utilização. Para as partículas de polvilho doce, cuja circularidade se aproxima de um círculo perfeito, 0,98, para a frequência de vibração de 12 Hz independente possibilitou a formação de tortas com maiores espessuras, menores resistências específicas das tortas e maiores porosidades quando comparadas ao sistema estático, além de menor força de adesão quando comparadas ao sistema estático. Isso possivelmente estar relacionado ao surgimento de lacunas nas tortas e à distribuição das partículas nas camadas das tortas. Enfim, o sistema de vibração mecânica independente e intermitente não possibilitou o desprendimento das tortas de filtração, porém influenciou a estrutura de formação das tortas.

Palavras-chaves: Filtração de gases; Vibrações mecânicas axiais; Materiais particulados.

ABSTRACT

Many studies related to the filtration of gases for the control and recovery of particulate materials have been developed with the aim of making the filtration system, both in the gas filtration operation as in the cleaning operation, more effective, with a longer useful life of the fabric filters and with greater ease of removal of cake filtration, taking into account the current laws regarding the emission of pollutants into the environment and reduction of maintenance and operation costs. In this context, in order to make the gas filtration operation more efficient, the objective of this work was to adapt a filtration system with vibration motor coupled axially to the gaseous flow that would allow the detachment of the filter cake without the need to stop the operation filtration, and to evaluate the influences of mechanical vibration frequencies in the formation of cakes as the forces of drag on the filter medium, the thickness of cake filtration, specific resistance of cake, porosity of cake compared with the static system. The manioc starch powder, pure talcum powder and phosphate rock were used as particulates in order to verify the influence of vibration on particulates with different morphologies and granulometric distribution. The surface filtration velocity of the gaseous stream was 10 cm / s at a mass flow rate of 0.183 g / s and the maximum pressure drop was 10000 Pa. The porosities of the cake filtration were determined by correlations found in the literature. The results showed that the frequencies of mechanical vibration 12, 17 and 18Hz influenced the structure of the cake and its removal for the rock phosphate particulate material, whose circularity was of 0.60, causing a formation of thinner cake filtration, more resistant cake filtration and less porous cake filtration when compared to the static system. As adhesion forces of material also higher for vibration frequencies than the static system. It was concluded that the mechanical vibrations caused a denser packing of the phosphate rock particles in the filter medium. As for the particulate material, pure talcum powder, whose circularity was of 0.67, the mechanical vibrations to both the independent system and the intermittent system provide behavior similar to the static system, it is not feasible to use. For the particles of manioc starch, whose circularity approaches a perfect circle, 0.98, for the independent vibration frequency of 12 Hz allowed the formation of cake filtration with greater thicknesses, smaller specific resistances of the cake filtration and larger porosities when compared to the static system, as well as lower adhesion force when compared to the static system. This may be related to the appearance of gaps in the cake filtration and the distribution of the particles in the layers of the cake filtration. Finally, the system of independent and intermittent mechanical vibration did not allow the detachment of the filter cake, but influenced the structure of the cake formation.

Keywords: Gas filtration; Axial mechanical vibration; Particulate matter.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A preocupação acerca dos efeitos nocivos da poluição do ar na saúde do ser humano tem ganhado maior importância mundial. A Organização Mundial da Saúde estima que 8 milhões de mortes prematuras ao ano são causadas pela má qualidade do ar e estão ligadas às doenças cardiovasculares, acidentes vasculares cerebrais, doenças respiratórias e cancerígenas. Além disso podem causar mudanças climáticas devido à emissão de poluentes como o carbono negro, o ozônio, o metano e o dióxido de carbono (*UNEP - United Nations Environment Programme, 2014*).

Com o objetivo de reduzir a emissão desses gases no meio ambiente criou-se o Protocolo de Kyoto em 1997, que estabelecia as metas obrigatórias para 37 países industrializados e toda a união europeia. Como os efeitos nocivos causados pela emissão dos gases de efeito estufa aumentaram, a Conferência do Clima da ONU aprovou um acordo denominado de Acordo de Paris que estabelecia que os países signatários da convenção do clima em 1992 adotassem medidas de combate às mudanças climáticas para aquecimento global médio menor que 2°C para um limite de 1,5°C a partir de 2020 (ONU, 2015).

Normas Nacionais de Qualidade do Ar Ambiente (*AAQS – National Ambient Air Quality Standards*) foram criadas com políticas, ações e programas de acordo com cada local que seria aplicada. Na década de 70 foi criada a Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) que define os padrões de qualidade do ar no nível nacional, assim como de gestão da qualidade do ar, acompanhamento de políticas estaduais, elaboração de estudos, coleta e sistematização de dados, definição de diretrizes e regras de atendimento mínimo entre outros (SANTANA et al., 2012).

Os Padrões Nacionais de Qualidade do Ar adotados nos EUA estabelecem limites para o CO, Pb, NO₂, O₃, e SO₂, definido MP₁₀, MP_{2,5} como material particulado inalável por partículas com diâmetros menores ou igual a 10 e 2,5µm, respectivamente.

No Brasil foram estabelecidos padrões de qualidade do ar válidos para todo o território nacional através da Resolução do CONAMA nº 3 de 28/06/1990 (Conselho Nacional de Meio Ambiente) em que os padrões de qualidade do ar são classificados em partículas totais em suspensão, fumaça, partículas inaláveis, dióxido de enxofre, monóxido de carbono, ozônio e dióxido de nitrogênio.

O grande problema para a saúde da sociedade é a quantidade dessas partículas inaláveis suspensas no ar.

Afim de atender aos padrões toleráveis e desejados na atmosfera, indústrias de diversos segmentos que geram materiais particulados ao meio externo, utilizam equipamentos de controle ambiental, tais como câmaras gravitacionais ou inerciais, precipitadores eletrostáticos, lavadores de gases, ciclone e filtração de gases por filtros de mangas como forma de minimizarem a emissão de partículas no ar e de atenderem à legislação, bem como necessários para a recuperação de materiais descartados na corrente gasosa, maximizando a redução dos custos (SOUZA, et al., 2012).

Dentre esses equipamentos ou operações responsáveis pela separação gás-sólidos, a filtração de gases com filtros de tecidos se destaca devido ser um dos métodos mais comuns, de fácil operação, baixo custo e alta eficiência de coleta.

A operação de filtração de gases com filtros de tecido ou mangas consiste na passagem de um fluxo gasoso contaminado por um meio filtrante, que com o passar do tempo, tem-se a formação da torta de material particulado, provocando o acréscimo da queda de pressão no meio filtrante, sendo necessária sua remoção.

A remoção das tortas de filtração pode ser realizada por diferentes mecanismos de limpeza do meio filtrante, nas quais os mais utilizados são jato de ar pulsante, fluxo de ar reverso e vibração mecânica.

O mecanismo de limpeza por jato de ar pulsante permite que a remoção da torta seja realizada durante à operação de filtração através da aplicação de jatos de ar que possibilitam o desprendimento da torta sem a interrupção da filtração. Porém, para a implantação desse sistema de limpeza há necessidade de altos investimentos de instalação e manutenção, pois reduz a vida útil do tecido com a danificação das fibras, provocado pelos jatos pulsantes.

Os mecanismos de limpeza por fluxo de ar reverso e vibração mecânica não permite que a limpeza da torta seja realizada concomitante à operação de filtração, porém devido apresentarem menor impactação mecânica na vida útil do tecido, Arouca (2014) desenvolveu um sistema de filtração de gases com um motor vibrador perpendicular ao fluxo de aerossol acoplado à câmara de filtração e estudou os efeitos da vibração mecânica na formação e remoção de tortas de filtração, variando as frequências de vibração e os tipos de materiais particulados.

Nesse trabalho, verificou-se que a frequência de vibração mecânica perpendicular concomitante à operação de filtração influenciou na estrutura da torta e contribuiu para a

formação de tortas menos porosas e menos espessas para todos os materiais particulados testados, porém não houve o desprendimento da torta de filtração.

Neste contexto, os objetivos deste estudo foram:

Objetivo geral: adaptar do sistema de filtração de gases utilizado por Arouca (2014) inserindo um motor vibrador longitudinal ao fluxo gasoso, afim de verificar se terá o desprendimento das tortas de filtração para diferentes materiais particulados.

Objetivos específicos: avaliar a influência da vibração mecânica longitudinal concomitante à operação de filtração em relação à porosidade da torta, resistência específica da torta de filtração, espessura da torta de filtração, força de adesão entre as partículas e o meio filtrante e a influência em ciclos de filtração.

A estrutura do trabalho será distribuída da seguinte forma:

Capítulo 2: apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estudo da formação e remoção de tortas de filtração contemplando conceitos, definições e trabalhos relevantes sobre filtração em filtros de manga para maior embasamento.

Capítulo 3: são descritos os equipamentos e materiais particulados utilizados para a realização dos testes, bem como a metodologia experimental adotada para a coleta de dados.

Capítulo 4: apresenta a discussão dos resultados obtidos no estudo teórico-experimental sobre filtração de gases e com base nas correlações encontradas na literatura.

Capítulo 5: são apresentadas as principais conclusões desse trabalho e sugestões de trabalhos futuros

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Capítulo 2 são abordados conceitos fundamentais sobre a filtração de gases e suas principais variáveis de projeto: regeneração do meio filtrante, material particulado, a operação de filtração de gases com a formação e remoção de tortas de filtração, ciclos de filtração, mecanismos de limpeza e trabalhos relevantes encontrados na literatura.

2.1 - A Filtração de gases

A operação de filtração de gases consiste basicamente na passagem de um fluxo de ar contaminado com material particulado através de um meio filtrante poroso que captura as partículas sólidas permitindo a passagem de fluxo limpo. Trata-se de uma das operações unitárias mais antiga, de baixo custo, fácil operação e de alta eficiência de coleta para ampla faixa de distribuição granulométrica (CAMPOS, 2009).

À medida em que se realiza a filtração, o material particulado suspenso na corrente gasosa se acumula sobre o meio filtrante e forma uma camada de pó denominada de torta de filtração. Inicialmente, o meio filtrante é o principal coletor das partículas que se aderem nos interstícios das fibras. Com o decorrer da filtração, há a formação da torta de pó, que se torna o principal coletor do material particulado presente na corrente gasosa. A Figura 2.1 ilustra de forma simples, a operação de filtração de gases.

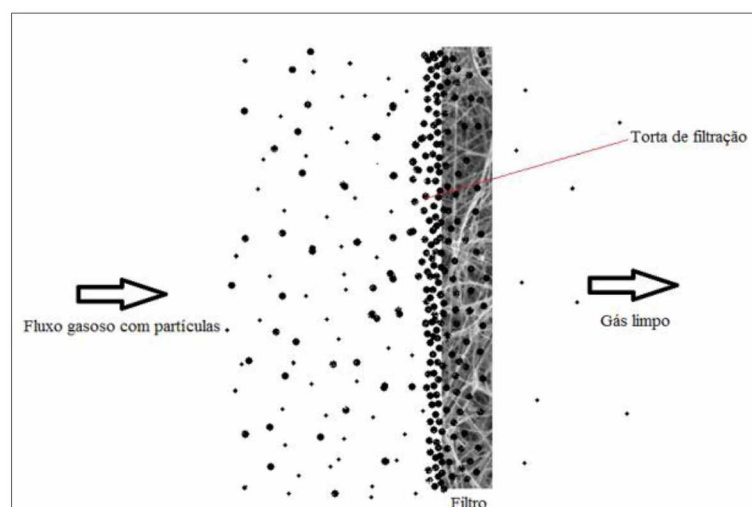


Figura 2.1: Esquema da operação de filtração de gases.

Com a formação da torta, a operação de filtração de gases torna-se mais eficiente, porém há um aumento no gasto energético, pois, com o acréscimo da espessura da torta de filtração há um aumento na queda de pressão no sistema (DONOVAN, 1985; RODRIGUES, 2004; SALEM & KRAMMER, 2007), sendo necessária a sua remoção.

2.2 - Os Mecanismos de captura de partículas

Existem, em princípio, cinco mecanismos presentes na deposição inicial das partículas nas estruturas do meio filtrante que são denominados: gravitacional, impactação inercial, interceptação direta, difusional e eletroforético conforme esquematicamente apresentados na Figura 2.2.

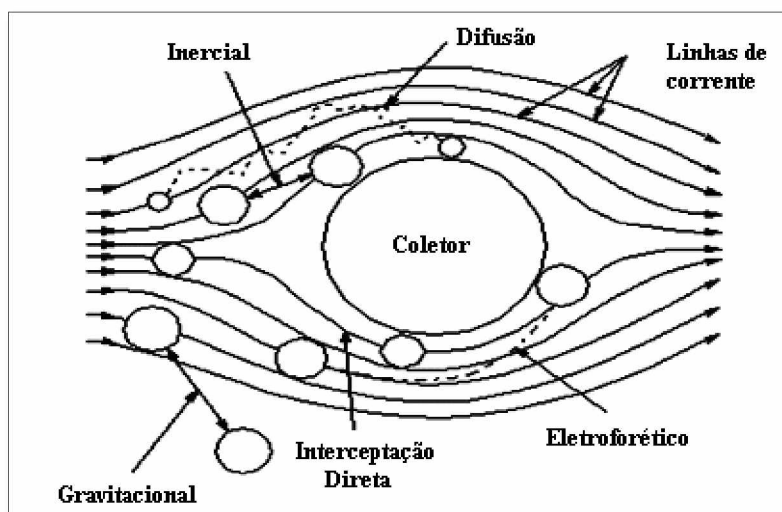


Figura 2.2: Mecanismos de captura de partículas (SPURNY, 1998).

Mecanismo gravitacional: nesse mecanismo de captura, as partículas sofrem o efeito gravitacional que provoca um desvio em sua trajetória original e é predominante em partículas maiores que $5\ \mu m$ com baixas velocidades (CAPES et al, 1997). A eficiência de coleta será maior quando o sentido do fluxo de direcionamento das partículas ocorrer de cima para baixo. O coletor pode ser fibroso ou leito granular.

A eficiência de coleta através do mecanismo gravitacional pode ser calculada através da Equação (2.1) (MATTESON, 1987 *apud* RODRIGUES, 2004):

$$\eta_G = \frac{d_p^2 \rho_p g}{18 \mu_g v_f} = \frac{v_t}{v_f} \quad (2.1)$$

em que, v_f é a velocidade do gás, ρ_p é a densidade das partículas, d_p é o diâmetro das partículas, μ_g é a viscosidade do gás, v_t velocidade terminal da partícula, g aceleração da gravidade.

Mecanismo de Impactação inercial: nesse tipo de mecanismo de captura admite-se que as partículas têm massa finita e que a presença de um corpo diante do escoamento é capaz de produzir uma curvatura nas linhas de corrente. Dessa forma, as partículas são projetadas de suas linhas originais sob ação inercial e, ao se aproximar no meio filtrante, chocam-se nele, podendo ou não se depositarem em sua superfície. (DULIEN, 1989).

A eficiência de coleta das partículas por este mecanismo é determinada através do número de Stokes, e aumenta com a energia cinética das partículas, conforme a Equação (2.2).

$$St = \frac{v_f \rho_p d_p^2}{18 \mu_g d_f} \quad (2.2)$$

em que, v_f é a velocidade superficial de filtração, ρ_p é a densidade das partículas, d_p é o diâmetro das partículas, μ_g é a viscosidade do gás e d_f é o diâmetro das fibras e St número de Stokes. Assim, a eficiência de coleta pelo mecanismo de captura inercial é estabelecida pela Equação (2.3) (MELLO, 2007):

$$\eta_I = \frac{0,0334 St^{3/2}}{1 + 0,0334 St^{3/2}} \quad (2.3)$$

Mecanismo de Interceptação direta: a interceptação direta acontece quando as partículas presentes no fluxo gasoso seguem o mesmo comportamento das linhas de corrente original do gás e são interceptadas nas fibras do meio filtrante devido apresentarem um raio maior que o espaçamento entre as fibras (THEODORE, 2008).

A eficiência de coleta pelo mecanismo interceptação direta pode ser determinada pela Equação (2.4). (LIU; RUBOW (1990).

$$\eta_{ID} = 0,6 \left(\frac{\varepsilon}{ku} \right) \frac{NR^2}{(1+NR)} C_r \quad (2.4)$$

em que,

$$C_r = 1 + \frac{1,996k_{nC}}{NR} \quad (2.5)$$

$$Ku = \frac{-\ln(1-\varepsilon)}{2} - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{(1-\varepsilon)^2}{4} \quad (2.6)$$

$$K_{nc} = \frac{\lambda}{L} \quad (2.7)$$

em que , NR é o parâmetro de interceptação, K_{nc} o número de *Knudsen* relativo ao coletor e C_r fator de correção, Ku é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara, λ caminho médio livre, L tamanho do sistema e ε é a porosidade .

Mecanismo Difusional ou produzido pelo movimento browniano: nesse tipo de mecanismo de captura, as partículas são muito pequenas, com diâmetro menor que $1\mu m$, e seu movimento é influenciado pelo bombardeamento do gás, causando a colisão das partículas às fibras do meio filtrante. Quanto menor o tamanho da partícula e mais baixa for a velocidade do gás, maior será a eficiência de captura das partículas.

A eficiência de coleta através do mecanismo difusional ou browniano é determinada pelas Equações (2.8) e (2.9) (PAYET et al (1992)), respectivamente:

$$\eta_D = 2,9 Ku^{1/3} Pe^{-2/3} \quad (2.8)$$

$$\eta_D = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} Pe^{2/3} \quad (2.9)$$

Nas Equações (2.8) e (2.9) Ku é o coeficiente de hidrodinâmico de Kuwabara e Pe é o número de Peclet, conforme as Equações (2.6) e (2.10).

$$Pe = \frac{v_f d_f}{D} \quad (2.10)$$

Na Equação (2.10), v_f corresponde à velocidade superficial de filtração, d_f é o diâmetro da fibra e D é o coeficiente de difusividade. O coeficiente de difusividade pode ser estimado pela Equação (2.11) de Stokes-Einstein, correspondendo para uma partícula esférica de diâmetro d_p :

$$D = \frac{K_B T C}{3\pi\mu_g d_p} \quad (2.11)$$

na qual K_B corresponde a constante de *Boltzman*, T é a temperatura absoluta, μ_g é a viscosidade do gás e C é o fator de escorregamento de *Cunningham* para a correção da descontinuidade do meio.

Mecanismo Eletrostático: as partículas durante a operação de filtração ao colidirem ou atritarem podem produzir um grau de carga eletrostática entre elas e o meio filtrante. O aumento da carga das partículas e das fibras do meio filtrante provoca uma maior eficiência de coleta (HINDS, 1999). Esse tipo de captura pode ocorrer por duas formas: deposição eletrostática coulômbico e dipolo-imagem. No coulômbico ocorre à atração entre as partículas carregadas e o coletor carregado com carga elétrica oposta, e o dipolo-imagem, ocorre à atração entre a partícula carregada e o dipolo induzido no coletor globalmente neutro (AGUIAR, 1991).

A eficiência de captura da partícula carregada com carga q através do mecanismo eletrostático ou eletroforético pode ser determinada pela Equação (2.12):

$$\eta_e = 8,2442 K_M^{0,494} \quad (2.12)$$

em que,

$$K_M = \frac{\gamma C q^2}{3\pi^2 d_p d_f^2 \mu_g v_f} \quad (2.13)$$

$St < 10^{-3}$ e $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$, K_M é o parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem, q carga da partícula, d_f diâmetro da fibra, d_p diâmetro da partícula, μ_g viscosidade do gás, v_f

velocidade do fluido, C fator de escorregamento de Cunningham e γ o coeficiente de polarização do coletor pode ser obtido pela Equação (2.14):

$$\gamma = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_f}{\varepsilon_c + 2\varepsilon_f} \quad (2.14)$$

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

A Figura 2.3 apresenta esquematicamente a relação entre a eficiência de coleta dos mecanismos de captura de partículas com o diâmetro de partícula.

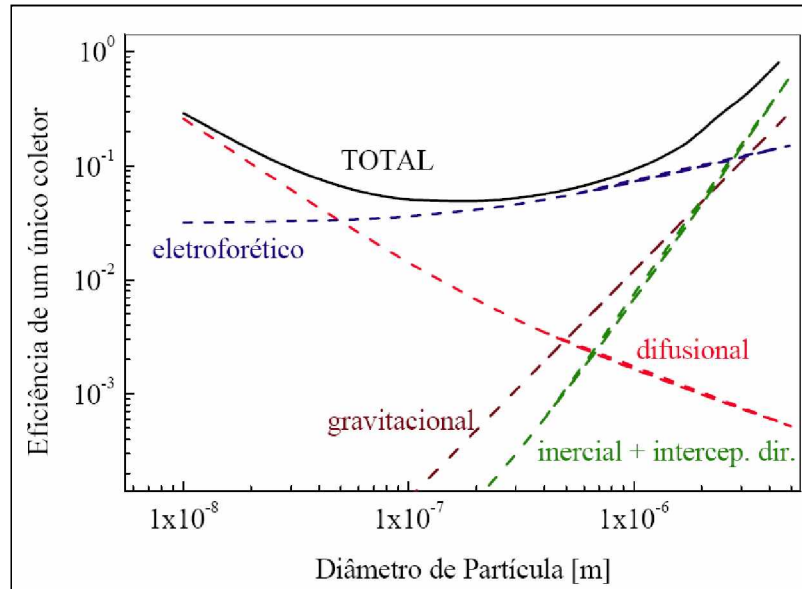


Figura 2.3: Mecanismo de captura de partículas em relação ao tamanho da partícula (adaptado COURY,1983).

A eficiência total corresponde à soma das eficiências de cada um dos mecanismos, porém há influência de um mecanismo sobre o outro. A eficiência de coleta será menor ou maior de acordo com o diâmetro das partículas. Os mecanismos gravitacional, inercial e de interceptação direta são mais presentes em partículas maiores que $2\mu m$. O mecanismo difusional tem maior significância em partículas de diâmetros menores que $0,3\mu m$ e o mecanismo eletroforético influencia mais nas faixas de diâmetros de partículas de $0,1 < d_p < 2\mu m$.

A eficiência total de coleta pode ser obtida pela soma de todos os mecanismos atuantes conforme a Equação (2.16):

$$\eta_T = \eta_D + \eta_{DI} + \eta_I + \eta_G + \eta_E \quad (2.16)$$

2.3 - A Formação das tortas de filtração

A formação das tortas de filtração sobre meio filtrante, de acordo com Tanabe (2008), se processa em três etapas distintas, conhecidas como filtração de profundidade ou interna, etapa de transição e filtração superficial.

Na primeira etapa de filtração, a filtração interna ou de profundidade, os principais coletores das partículas são as fibras, ou seja, as partículas penetram nos interstícios das fibras por ação de mecanismos de capturas como mecanismo de captura por ação gravitacional, por impactação inercial, interceptação direta, por difusão e eletrostático já abordados (THEODORE e BUONICORE, 1988). A Figura 2.4 representa a etapa de filtração interna.

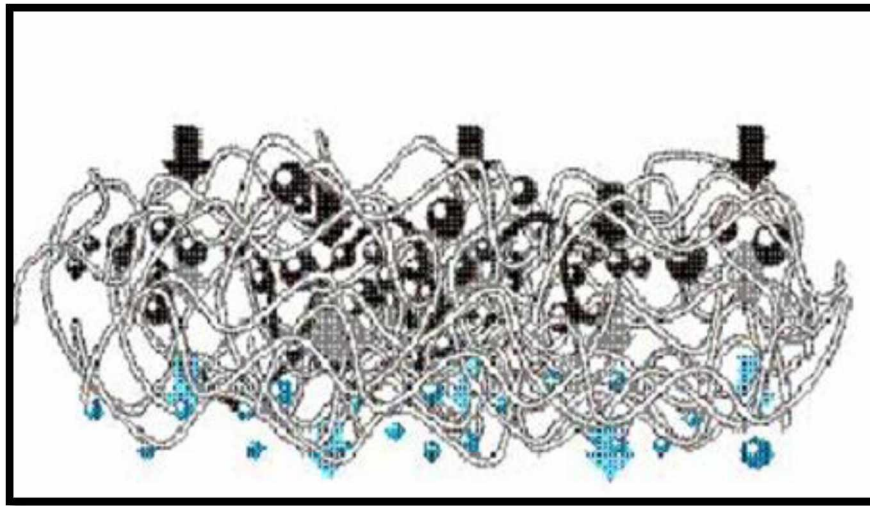


Figura 2.4: Filtração interna ou de profundidade (Renner Textil Ltda, 2001).

De acordo com Wash et al.,(1996), a intensidade de penetração das partículas nas fibras do tecido é alta, mas tende a diminuir com o tempo de filtração. A eficiência de coleta das partículas e a perda de carga no meio filtrante aumentam, à medida que se realiza a operação de filtração, apresentando um comportamento linear em relação a massa de pó acumulada no tecido. A duração dessa fase depende das características do meio filtrante como suas porosidade e permeabilidade.

As estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do tecido são denominadas de dendritos

e correspondem ao novo meio coleta das partículas. A aglomeração desses dendritos, de acordo com Bergman et al. (1980), ocorre em quatro etapas: 1) a deposição das partículas nas fibras do tecido limpo (aumento das fibras), 2) a deposição de partículas na superfície do tecido e início da formação dos dendritos, 3) crescimento dos dendritos e interação destes com os dendritos vizinhos e 4) formação da torta de filtração.

Segundo Payatakes (1977), não diferente de Bergman et al. (1980), essa etapa se dá primeiramente com a deposição de partículas sobre partículas e segue-se com a fase em que esses dendritos formados se interagem com os dendritos vizinhos até formarem uma camada não uniforme ao redor de cada fibra e formarem uma camada denominada por ele como matriz porosa interna. Assim, esses dendritos formados internamente passam a se constituir o que é denominado de torta de filtração. Nessa etapa, há um acréscimo na perda de carga e diminuição da penetração das partículas no interior do meio filtrante. A Figura 2.5 representa a formação dos dendritos em relação aos valores das constantes que definem os mecanismos de captura: R (caracteriza a captura por interceptação), Peclet e Stokes.

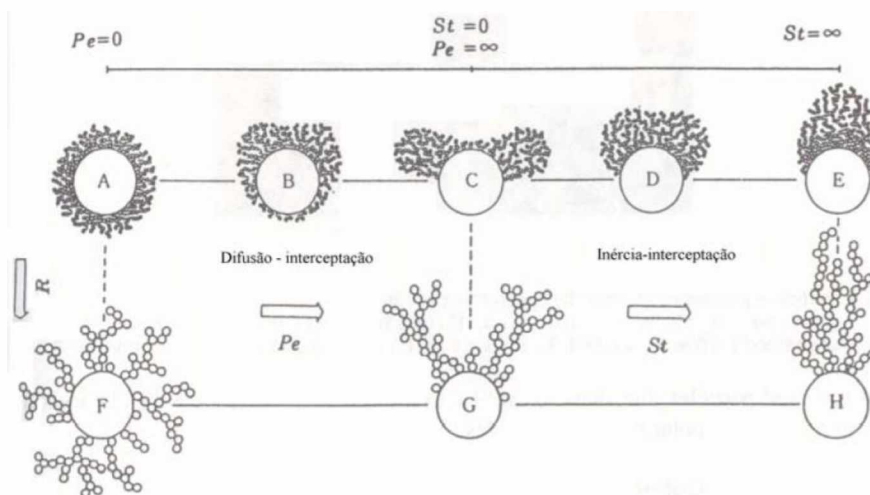


Figura 2.5: Superposição dos dendritos na superfície do tecido (RODRIGUES, 2006).

Com a formação da torta de filtração, tem-se a terceira etapa denominada filtração superficial, em que a própria torta de filtração passa a ser o principal meio de captura de partículas, sendo capaz de remover as partículas mais finas da corrente gasosa pelos mecanismos de captura e, o meio filtrante, passa atuar como suporte para a torta de filtração.

A Figura 2.6 representa a etapa de filtração superficial para a formação das tortas de filtração.

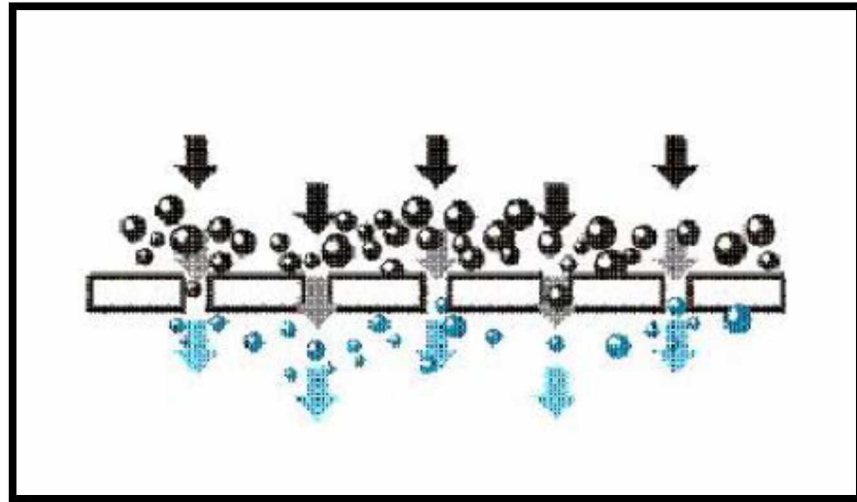


Figura 2.6: Filtração superficial de filtração (RENNER TEXTIL LTDA, 2001).

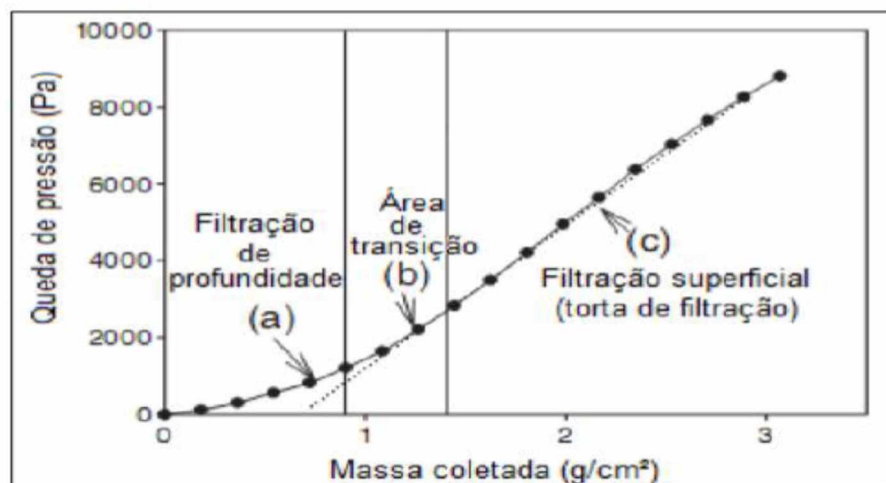


Figura 2.7: Queda de pressão em função da massa de pó acumulada (SONG, 2006)

Para que o sistema tenha maior eficiência de remoção, é interessante que a etapa de filtração superficial se estabeleça o quanto antes (RODRIGUES, 2006).

A Figura 2.7 representa a queda de pressão em relação à massa de pó acumulada por unidade de área e ilustra as três etapas de formação das tortas de filtração apresentadas anteriormente.

A estimativa do momento em que ocorre a formação das tortas de filtração é uma questão complexa de determinação, uma vez que, os meios filtrantes não apresentam uma estrutura uniforme.

De acordo com Wash et al.(1996), Japuntich et al. (1996), Wash e Stenhouse (1997) e Rocha (2010) é possível determinar o momento de início da formação da torta admitindo um valor experimental denominado de ponto de colmatação, que pode ser definido como um lugar geométrico obtido pelo gráfico da perda de carga em relação a massa de pó acumulada por unidade de área ou carga mássica correspondente ao cruzamento do prolongamento da reta de filtração superficial com o eixo das abscissas, possibilitando conhecer a massa de material particulado necessária para o início da formação da torta de filtração.

Essa estimativa torna-se mais precisa quanto menores forem as partículas do material particulado, quanto mais densamente empacotados forem os meios filtrantes, ou seja, meios filtrantes com menor permeabilidade ao ar. A Figura 2.8 representa a determinação do ponto de colmatação do meio.

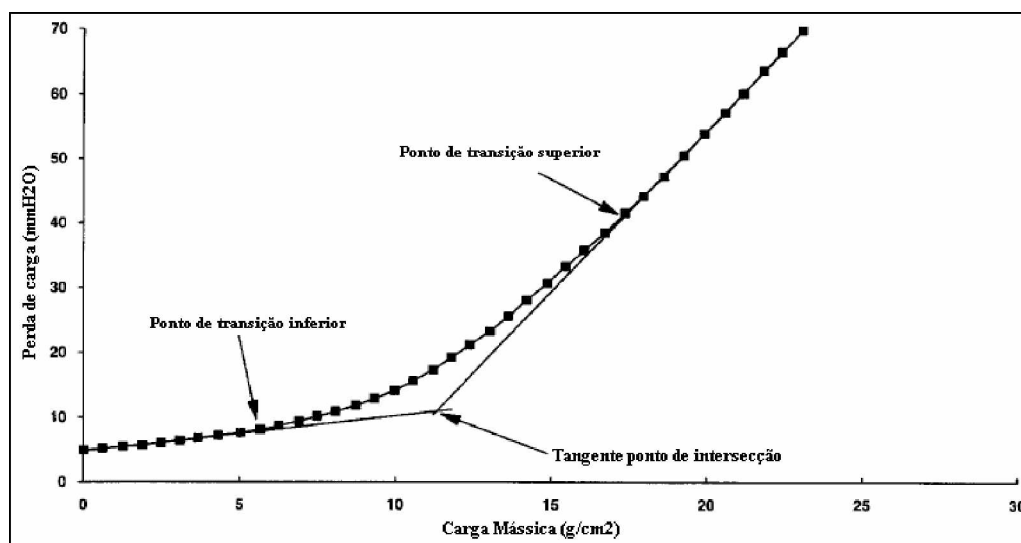


Figura 2.8: Determinação do ponto de colmatação do meio (JAPUNTICH et al., 1996)

2.4 - As Curvas de filtração

Durante a operação de filtração, a curva formada pela queda de pressão em função do tempo de filtração apresenta três comportamentos distintos: côncava para baixo, côncava para cima e linear.

A curva de filtração com concavidade para baixo ocorre quando há deposição inicial das partículas no interior do meio filtrante, com ciclo de filtração com rápida formação de torta de filtração. O comportamento linear indica uma deposição inicial superficial das partículas no meio filtrante de forma uniforme, ou seja, sem penetração de pó no tecido. A concavidade para cima indica que há um maior período de filtração de profundidade, com formação da torta de filtração mais lenta. Esse tipo de curva ocorre quando a torta de filtração já foi formada e removida parcialmente. A remoção parcial da torta denomina-se de *Patchy Cleaning*.

A Figura 2.9 representa os três comportamentos da curva de filtração.

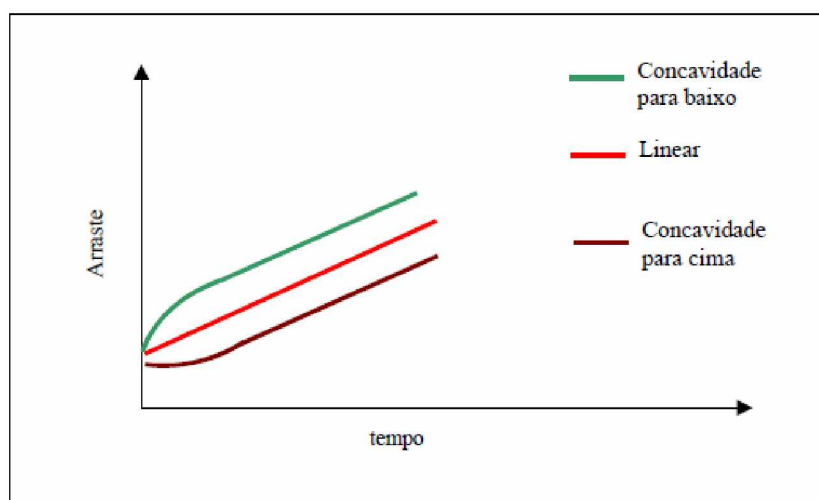


Figura 2.9: Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração (TANABE, 2008).

A operação de filtração é cíclica, ou seja, considera-se um ciclo de filtração após uma filtração e uma remoção da torta de filtração. Após a regeneração do tecido realiza-se uma nova filtração, de acordo com a ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES (2003), a NORMA VDI 3926, o comportamento dos ciclos de filtração pode ser de três tipos: ciclos de filtração ideais, ciclos de filtração reais e ciclos de filtração reais com regeneração incompleta.

A Figura 2.10 ilustra o comportamento ideal dos ciclos de filtração.

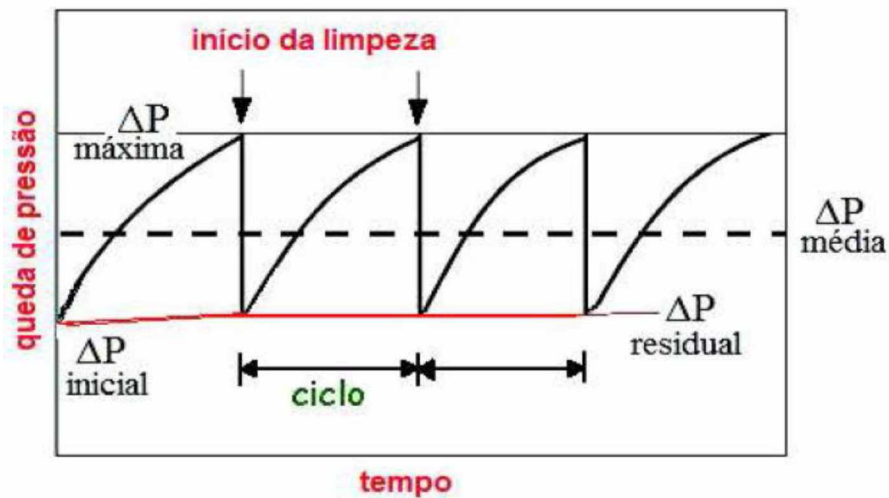


Figura 2.10: Comportamento ideal dos ciclos de filtração (ROCHA, 2010).

O comportamento ideal dos ciclos de filtração considera uma compactação uniforme da torta de filtração, com fluxos e concentrações de pó constantes e limpeza uniforme. Isso leva a ciclos de filtração uniformes em que o tempo de filtração do ciclo é igual ao tempo de filtração no tecido virgem. Devido a presença de uma camada fina de pó, com espessura uniforme após a operação de limpeza do tecido há o aumento da perda de carga residual.

O comportamento de ciclo real apresenta uma redução considerável do tempo de ciclo em comparação ao comportamento ideal dos ciclos, como pode ser visto na Figura 2.11. Observa-se que devido à compressão da torta não há um comportamento linear nos primeiros ciclos de filtração.

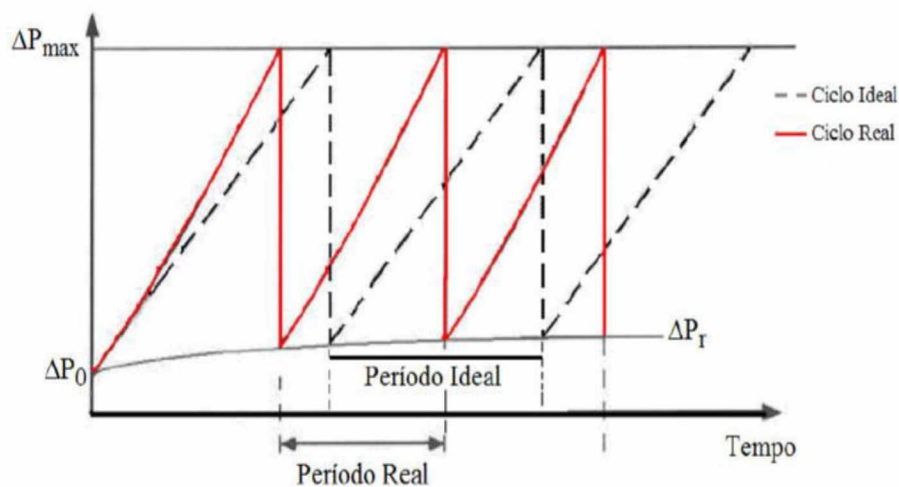


Figura 2.11: Comportamento real dos ciclos de filtração (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMAES, 2003).

O comportamento dos ciclos de filtração reais com regeneração incompleta se dá quando a remoção das tortas de filtração ocorre em blocos, e também é conhecido como *Patchy Cleaning*. Quando esse fenômeno ocorre, ao retornar com uma nova filtração, há uma redução no tempo de ciclo, redução da área efetiva de filtração e a presença de fendas na torta de filtração. Assim, a curva dada pela queda de pressão em função do tempo de filtração se torna convexa, pois em um fluxo de volume constante, a velocidade de filtração é maior nas áreas regeneradas e a deposição das partículas forma-se principalmente nessa área do meio filtrante, como pode ser observado na Figura 2.12.

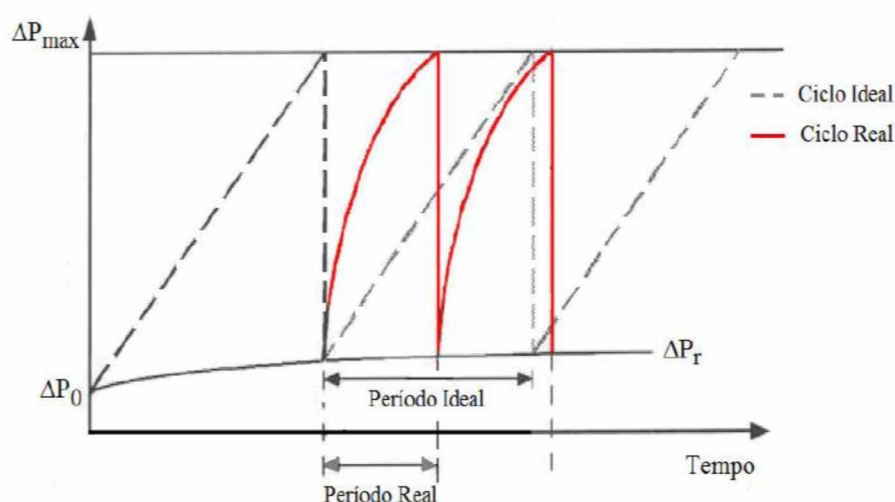


Figura 2.12: Comportamento real dos ciclos com regeneração incompleta (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMAES, 2003).

O fenômeno *Patchy Cleaning* ou limpeza por blocos de acordo com Kochet al. (1996) ocorre devido as tortas de filtração não serem uniformes, apresentando regiões que apresentam menor força de adesão ao meio filtrante e, são nessas regiões em que ocorrem as fendas ou rachaduras que se propagam rapidamente. Já Seville et al. (1989) perceberam que o *patchy cleaning* varia de acordo com as mudanças operacionais e que a operação realizada em altas velocidades pode ocasionar a rachadura das tortas de filtração durante a limpeza devido a coesão das partículas (CALLÉ et al., 2001).

Kavouras e Krammer (2003) informam que a limpeza por blocos resulta tanto pela formação de tortas de filtração com espessuras não uniformes durante a filtração quanto em velocidades de filtração não uniforme no ciclo seguinte, influenciando no próximo ciclo de filtração e na perda de carga.

2.5 - Os Mecanismos de limpeza

Na medida em que se realiza a filtração de gases, a queda de pressão varia de acordo com a espessura da torta de filtração e, conseqüentemente, com o tempo de filtração. A variação da queda de pressão aumenta proporcionalmente com o aumento da espessura da torta de filtração. Quanto maior a espessura das tortas de filtração maior será a queda de pressão no sistema e, conseqüentemente, maior gasto energético. Dessa forma, necessita-se de uma limpeza periódica que possibilite a regeneração do tecido através da remoção das tortas de filtração de modo a manter a queda de pressão em níveis adequados para operação.

Na prática, não há a remoção total da torta no meio filtrante e constata-se que há uma camada fina de material particulado proveniente das etapas de filtração interna ou profundidade e filtração superficial (KOCH et al., 1996).

A remoção do material particulado depende das características do meio filtrante e tipo do mecanismo de limpeza empregado, pois este interfere na vida útil do tecido. Uma intensa remoção da torta de filtração pode causar danos às fibras do meio filtrante, redução da eficiência de coleta (CIRQUEIRA, 2013) e má formação da camada porosa, e em se tratando de ciclos de filtração, ocasiona um aumento da queda de pressão residual (TANABE, 2008) de forma linear com o número de ciclos de filtração (LO et al., 2010).

A operação de limpeza do meio filtrante pode ser realizada de formas diferentes. Destacam-se os mecanismos de limpeza por fluxo de ar reverso, jato de ar pulsante e por vibração mecânica (COOPER et al. 2002).

A Figura 2.13 representa o mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso.

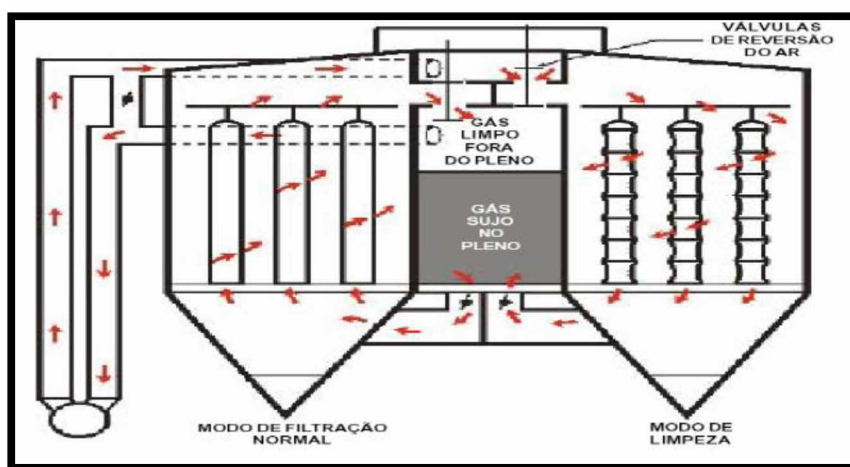


Figura 2.13: Mecanismo por fluxo de ar reverso (RENNER TEXTIL LTDA, 2001).

A limpeza por fluxo de ar reverso consiste da passagem de fluxo de ar limpo em sentido contrário à operação de filtração, o que fratura e desloca a torta de filtração do meio filtrante. É uma técnica bastante simples, de fácil operação com duração de 1 a 5 minutos, baixo consumo de energia e permite maior duração do tecido por operar com velocidades de filtração relativamente baixas. Uma desvantagem desse mecanismo é que é preciso interromper a operação de filtração para a realização da limpeza (COOPER et. al., 2002).

A Figura 2.14 representa o mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso

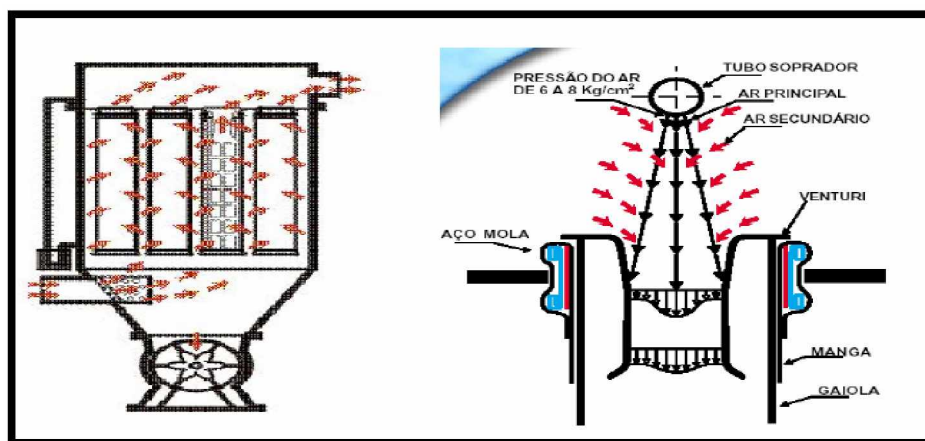


Figura 2.14: Mecanismo por pulso de ar (RENNER TEXTIL LTDA, 2001).

A Figura 2.14 representa o mecanismo de limpeza por pulso de ar que é outro tipo de mecanismo utilizado para a remoção de partículas é o pulso de ar reverso ou jato de ar pulsante que se apresenta de forma similar ao fluxo de ar reverso em seu princípio de funcionamento. Nesse mecanismo, a torta de filtração formada é submetida a jatos de ar em sentido contrário à filtração, provocando expansão das mangas, fratura da torta e remoção do material particulado (CHEREMISINOFF, 2002).

Esse mecanismo apresenta como desvantagens alto custo de equipamento, consumo de energia diminuição da vida útil do tecido devido ao maior desgaste das fibras do meio filtrante. Uma vantagem é que é possível operar com altas velocidades e que as operações de filtração e limpeza acontecem concomitantemente, pois os jatos de ar ocorrem em frações de segundos (AROUCA, 2014).

Por fim, tem-se o mecanismo de remoção por vibração mecânica, conforme a Figura 2.15 , que consiste na agitação ou vibração do meio filtrante através de um motor excêntrico acoplado no sistema de filtração que provoca uma aceleração no tecido em função da frequência, imprime um movimento oscilatório e amplitude de vibração rompendo as forças

adesivas da interface torta-tecido. Esse sistema de limpeza é de fácil montagem e operação, com baixo custo de implantação e manutenção para aplicação em sistemas de pequeno e médio porte. O tempo gasto para limpeza varia de 1 a 5 minutos, porém, as operações de filtração e limpeza são realizadas separadas, como o mecanismo por fluxo de ar reverso (COOPER et al. 2002).

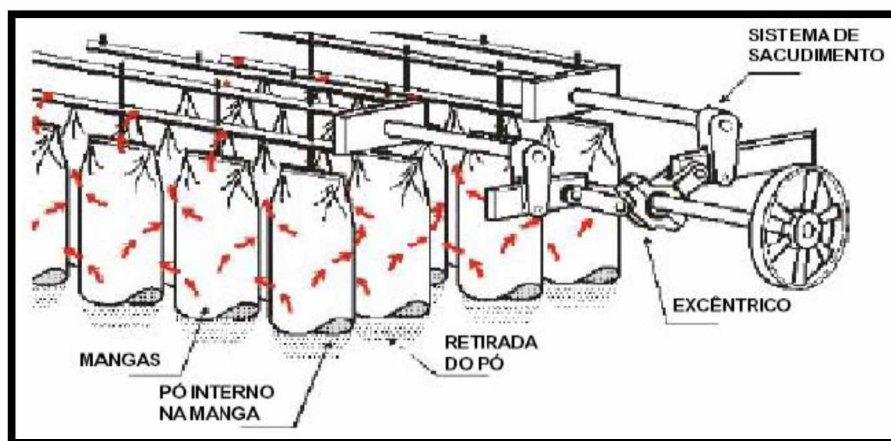


Figura 2.15: Mecanismo de limpeza por vibração mecânica (RENNER TEXTIL LTDA, 2001).

Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais características dos tipos de tecidos e fibras utilizadas na filtração de gases com filtros mangas e limpeza abordados.

Tabela 2.1: Características dos mecanismos de limpeza no sistema de filtração de gases (THEODORE&BUONICORE, 1988).

Mecanismo de limpeza	Uniformidade de limpeza	Tipo de tecido	Velocidade de filtração	Custo do equipamento	Custo de energia	Carga de poeira
Fluxo de ar reverso	Boa-Média	Trançado	Média	Médio	Médio-baixo	Média
Pulso de ar reverso	Muito boa	Trançado Feltro	Alta	Alto	Alto	Alta
Vibração Mecânica	Boa	Trançado	Média	Médio	Médio-baixo	Média
Manual	Boa	Trançado Feltro	Média	Baixo	-	Baixa

2.6 – O Meio filtrante

Todo sistema de filtração requer meios filtrantes que sejam capazes de reterem o material com máxima eficiência de coleta e com uma vida útil longa. Segundo Perry (1999) considera-se que a seleção do tipo de material filtrante é a fase mais importante para uma adequada operação de filtração de tortas e deve-se observar os seguintes aspectos:

1. Apresentar rápida capacidade de retenção de sólidos em toda superfície filtrante;
2. Possuir baixa taxa de entupimento de sólidos nos interstícios das fibras do tecido;
3. Exibir resistência à pressão exercida pela torta de filtração;
4. Apresentar alta permeabilidade;
5. Ter alta resistência ao ataque de produtos químicos presente no processo;
6. Possuir alta resistência mecânica para uma vida útil longa;
7. Possibilitar que a descarga da torta do filtro pelo meio filtrante deve ser executada sem dificuldades e de maneira uniforme.
8. Ser facilmente moldado no sistema de filtração utilizado;
9. Apresentar baixo custo em relação ao custo de operação.

Segundo Barnett (2000), a seleção do meio filtrante está relacionada a compatibilidade deste com o material particulado que será retido durante a operação de filtração, bem como a influência da temperatura, abrasão, energia de absorção, resistência à álcalis, ácidos, ao oxigênio e até ao custo do material.

A diversidade dos processos relacionados à operação de filtração, introduziu uma grande variedade de tipos de meios filtrante em uso industrial, classificando-os em tecidos trançados e em tecidos não trançados, também conhecido como feltros.

Os tecidos trançados são produzidos por entrelaçamento das fibras que os compõe com fios longitudinais (urdume) cruzados em ângulo reto com fios transversais (trama) por meio de um tear. Esses tipos de tecidos podem ser classificados pela gramatura, por ligamentos e pela resistência ao estouro da fibra (ABINT, 2012).

De acordo com Ceron (2012), a maioria das fibras trançadas são utilizadas em sistemas que operam a baixas velocidades como por fluxo de ar reverso e vibração mecânica, porque as fibras apresentam baixas resistências a corrente gasosa. A Figura 2.16 representa um tecido trançado.

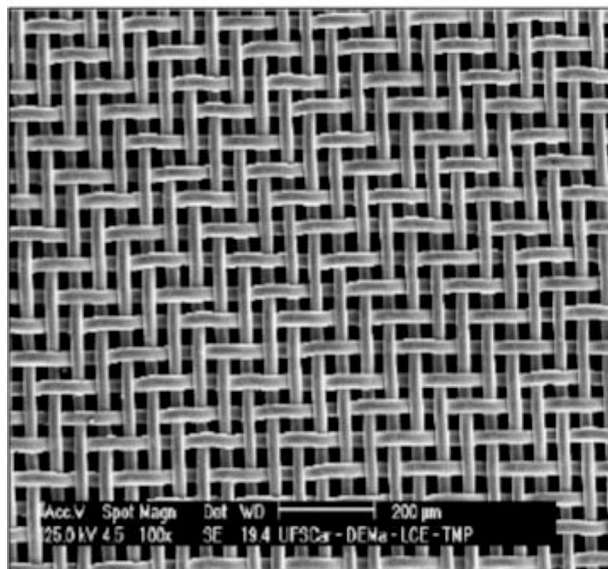


Figura 2.16: Microscopia eletrônica de varredura do tecido (TANABE, 2011).

Os tecidos não trançados ou feltros são mais utilizadas em operações de filtração cuja limpeza é feita por pulsos de ar devido apresentarem maior quantidade de poros por unidade de área (CERON, 2012). A Figura 2.17 representa um tecido não trançado.

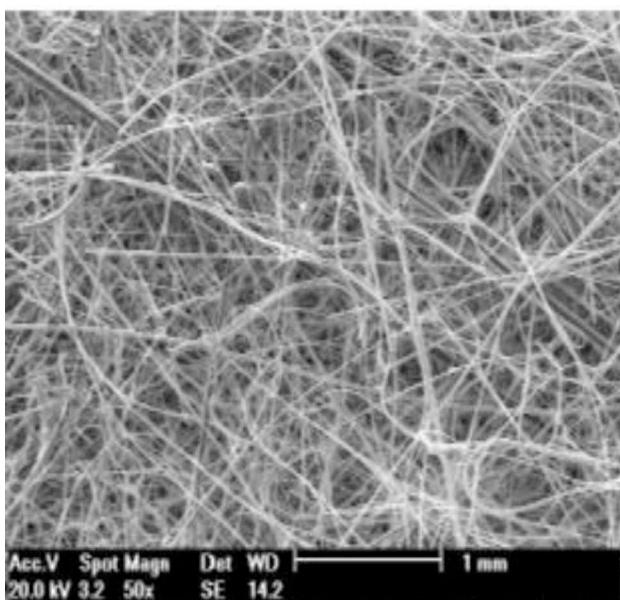


Figura 2.17: Microscopia eletrônica de varredura do tecido não trançado.

As especificações de um tecido não trançado são reconhecidas pela gramatura, densidade relativa, espessura, tipo de fibra, inflamabilidade, resistência ao calor, análise por solvente e acabamento com a superfície (ABINT, 2012).

Um tecido não trançado é feito a partir de uma trama de fibras sem a preparação do fio requerida por entrelaçamento. As fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso. A integridade estrutural desta trama é dada pelo ancoramento mecânico das fibras, união induzida térmica ou quimicamente ou aplicação de alguns adesivos ou resinas (INDA (ASSOCIATION OF NONWOVEN FABRICS INDUSTRY apud RODRIGUES, 2004).

As fibras do meio filtrante podem ser classificadas em fibras naturais ou sintéticas (BRT, 2009 – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas). As fibras naturais são provenientes de origem animal, vegetal ou mineral. Pode-se citar como fibras naturais, as celulósicas como o algodão, coco, o linho; as proteicas como lã de ovelha, alpaca, lhama, vicunha e a seda.

As fibras sintéticas são produzidas por soluções químicas não derivadas de soluções naturais para o processamento de polímeros de cadeias longas. Como exemplo têm-se as de nylon, de poliéster, de polipropileno, de acrílico, de poliamida e de polietileno (DONOVAN, 1985); (BRT, 2009 – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas).

A Tabela 2.2 apresenta algumas características de diversos materiais filtrantes utilizados na operação de filtração (REYNOL JR, 2005).

Tabela 2.2: Características dos meios filtrantes utilizados na filtração de gases (REYNOL JR, 2005).

Nome genérico	Resistência a abrasão	Resistência a ácidos	Resistência a álcalis	Resistência a agentes oxidantes	Resistência a solventes	Temperatura máxima de operação (°C)
Acetato						
Acetato de celulose	Boa	Razoável	Pouca	Boa	Boa	100
Acrílico	Boa	Boa	Razoável	Boa	Excelente	150
Fibra de idro	Pouca	Excelente	Pouca	Excelente	Excelente	300
Nylon	Excelente	Razoável	Boa	Razoável	Boa	100
Poliéster	Excelente	Boa	Excelente	Boa	Boa	150
Polietileno	Boa	Boa	Boa	Razoável	Boa	75
Polipropileno	Boa	Excelente	Excelente	Boa	Boa	120
Algodão	Boa	Pouca	Razoável	Boa	Excelente	100

Para a obtenção do máximo desempenho do meio filtrante na liberação das tortas de filtração formadas, os tecidos têm passado por processos de tratamento em sua superfície. Esses tratamentos podem ser mecânicos, químicos e térmicos (DONOVAN, 1985). Os tipos de tratamento podem ser por:

- Calandragem (“*Calendering*”): o tecido é comprimido por rolos com elevadas temperaturas e pressão afim de obter uma superfície uniforme. Esse procedimento é realizado em tecidos não trançados e a temperatura é a variável do processo de tratamento (DONOVAN, 1985).
- Chamuscagem (“*Singering*”): as fibras salientes da superfície do tecido são chamuscadas afim de aumentar a eficiência de regeneração do tecido e evitar que estas incorporem na torta formada.
- Escovação (“*Napping*”): realizada em tecidos trançados com o objetivo de aumentar a área de coleta das partículas através da raspagem da superfície do meio filtrante devido a eficiência inicial de coleta das partículas ser baixa (ROTHWELL, 1989).
- Impregnação química: o tecido é imerso em uma solução química para aumentar a resistência aos ácidos, retardar a propagação das chamas e facilitar o desprendimento das tortas de filtração (CLARK, 2001).
- Envernizamento ou envidramento (“*Glazing*”): as fibras são submetidas a altas temperaturas e pressões e envolvidas em uma resina natural ou sintética para um aspecto vitrificado. Este tipo de tratamento proporciona um melhor desempenho na resistência mecânica do material (DONOVAN, 1985).

Esses tratamentos são os mais usuais, porém há outros tais como tratamento antiestático, a orientação de fibras, o recobrimento com membranas, a plastificação de uma das superfícies ou ambas (LORA, 2002).

2.7 - Variáveis importantes na operação de filtração

A queda de pressão no meio filtrante, a porosidade da torta de filtração, a resistência específica do meio filtrante, a resistência específica da torta, a velocidade superficial de filtração, a porosidade do meio filtrante e a permeabilidade são os principais parâmetros presentes na operação de filtração de gases.

2.7.1 - Queda de pressão no sistema de filtração

Considera-se como uma das principais variáveis no sistema de filtração de gases a queda de pressão no meio filtrante, pois esta determina a frequência de limpeza do tecido e a potência requerida no sistema de filtração. Porém, a queda de pressão ou perda de carga no meio filtrante é dependente de sua permeabilidade, da velocidade de filtração e da viscosidade do gás. Já a queda de pressão na torta de filtração é dependente da área, da concentração das partículas, da velocidade de filtração e da resistência específica da torta (SALEEM & KRAMMER, 2007); (ROCHA, 2010).

Dessa forma, a queda de pressão total em um sistema de filtração pode ser definida como a soma das quedas de pressão no meio filtrante, ΔP_m e na torta formada, ΔP_c . Logo, a queda de pressão total é estimada pela Equação (2.17).

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_c \quad (2.17)$$

A medida que se deposita material particulado no tecido para a formação da torta de pó, a queda de pressão no tecido aumenta.

O comportamento da queda de pressão no meio filtrante e na torta de filtração pode ser obtido através da teoria darciana, considerando baixos valores de Reynolds (LICHT, 1988). A Equação (2.18) descreve a queda de pressão total no sistema de filtração.

$$\Delta P_T = k_1 v_f + k_2 v_f W \quad (2.18)$$

em que k_1 é a resistência específica do meio filtrante, v_f é a velocidade superficial de filtração, k_2 é a resistência específica da torta de filtração e W é a massa de pó acumulada por unidade de área.

Dividindo-se a Equação (2.18) pela velocidade superficial de filtração de arraste chega-se a Equação (2.19) que define o arraste do filtro (S) como a queda de pressão por unidade de velocidade de filtração, ou seja, corresponde a resistência do filtro (RODRIGUES, 2006).

$$\frac{\Delta P_T}{v_f} = k_1 + k_2 W \quad (2.19)$$

em que k_1 é a resistência específica do meio filtrante, v_f é a velocidade superficial de filtração, k_2 é a resistência específica da torta de filtração e W é a massa de pó acumulada por unidade de área e $\frac{\Delta P_T}{V_f} = S$ é o arraste do filtro.

A Equação 2.19 mostra que, para casos de tortas compressíveis, o arraste (S) varia linearmente com a massa de pó acumulada por unidade de área (W), porém a equação é válida apenas após a formação da torta em que a deposição de partículas é considerada homogênea em que o arraste aumenta linearmente com a massa de pó acumulada (LUCAS, 2000)

2.7.2 - Permeabilidade do meio filtrante

A permeabilidade é uma propriedade do meio filtrante definida como a facilidade em que um fluido submetido a um gradiente de pressão ultrapassa os poros de sua superfície, no qual gera uma perda de energia que é refletida por um diferencial de pressão na entrada e saída do meio filtrante (INNOCENTINI et al., 1999).

A permeabilidade pode ser determinada através de equações que quantificam a resistência do meio filtrante ao escoamento do gás para baixas velocidades em meios porosos granulares, homogêneos e incompressíveis (Lei de Darcy) e para fluidos compressíveis em que a queda de pressão descreve uma relação não linear com a velocidade superficial de filtração

A relação empírica para a determinação da permeabilidade de acordo com Darcy pode ser calculada pela Equação (2.20):

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{K_1} v_f \quad (2.20)$$

em que ΔP_m a queda de pressão no meio filtrante, L_m espessura do meio filtrante, K_1 permeabilidade darciana, v_f velocidade de filtração e μ_g viscosidade do gás.

A Equação de Forchheimer é composta pelos termos de forças viscosas e forças inerciais, respectivamente, e pode ser determinado pela equação (2.21):

$$\frac{\Delta P_m}{L_m} = \frac{\mu_g}{K_1} v_f + \frac{\rho_g v_f^2}{K_2} \quad (2.21)$$

sendo ΔP_m a queda de pressão no meio filtrante, L_m a espessura do meio filtrante, K_2 a permeabilidade não darciana, v_f a velocidade de filtração, μ_g a viscosidade do gás e ρ_g a densidade do gás.

2.7.3 - Velocidade superficial de filtração

Outra variável de grande importância nos projetos de sistemas de filtração de gases é a velocidade superficial de filtração. Essa variável pode influenciar na profundidade que as partículas podem penetrar nas fibras do tecido, ou seja, velocidades altas acarretam uma maior penetração de partículas, reduzem a área de filtração e dificultam a operação de remoção das tortas de filtração, influenciam também no tempo de operação e vida útil do tecido. Já baixos valores de velocidade aumentam o custo energético, pois demandam maior tempo para penetração das partículas (DONOVAN, 1985); (TANABE et al., 2008) e SANTINI (2011).

Com isso, percebe-se que a velocidade superficial de filtração influencia tanto no custo inicial do equipamento quanto no custo operacional. De acordo com o Leith e Allen (1986) recomenda-se operar sistemas de filtração com velocidades intermediárias entre as faixas de 0,5 e 10 cm/s.

2.7.4 - Porosidade da torta de filtração

A porosidade da torta de filtração pode ser estimada por dois métodos que se destacam: Método Direto e Método Indireto.

O método direto também conhecido como método experimental foi desenvolvido por Aguiar (1995). Esse método consiste no pré-endurecimento da torta de filtração, seguido por cinco etapas: embutimento do tecido, seccionamento, esmerilamento, polimento e análise de imagens, sendo possível quantificar a porosidade das tortas de filtração.

O método indireto consiste na determinação das tortas de filtração através de correlações clássicas na literatura que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido.

A Equação de Ergun (1952) quantifica a queda de pressão no meio filtrante e sua utilização corresponde a sistemas de filtração cuja porosidade do leito varia entre 0,1 e 0,75 para tamanhos de partículas entre 10^2 e $10^4 \mu\text{m}$, número de Reynolds da partícula maior que a

unidade, leitos fixos e distribuição de tamanhos estreita (ENDO, 1998). A Equação de Ergun (1952) é dada pela Equação (2.22):

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_g V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.22)$$

em que μ_g é a viscosidade do gás, v_f é a velocidade superficial do fluido, d_p é o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes), L é a espessuras da torta, ρ_g é a densidade do gás e ε é a porosidade.

Em operações de filtração com baixos valores de Reynolds considera-se que o escoamento é puramente viscoso e despreza-se o termo inercial. Assim, a Equação (2.22) pode ser simplificada para a Equação (2.23)

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu_g V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (2.23)$$

Observa-se que a porosidade da torta de filtração é em função da queda de pressão, viscosidade do gás, diâmetro da partícula, velocidade superficial de filtração, densidade do gás e da espessura da torta de filtração. A espessura da torta de filtração é complexa de se obter experimentalmente. Devido a isso, Coury (1983) desenvolveu um método indireto que permite determinar a porosidade da torta de filtração, admitindo-a que se a porosidade da torta é constante e há alta eficiência de coleta, a massa de partículas depositadas na torta de filtração, em um determinado tempo pode ser estimada pela Equação (2.24):

$$M_t = Qt = LA\rho_p(1-\varepsilon) \quad (2.24)$$

em que, M_t é a massa da torta, Q é a vazão mássica de pó, A é a área superficial da torta, ρ_p é a densidade das partículas e t é o tempo de filtração. Isolando-se L na Equação (2.24) têm-se a Equação (2.25):

$$L = \frac{Qt}{A\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.25)$$

Substituindo a Equação (2.25) na Equação (2.23) obtém-se:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1-\varepsilon)Q\mu v_f}{A\rho_p \varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75Q\rho_g v_f^2}{A\rho_p \varepsilon^3 d_p} \quad (2.26)$$

Para escoamento puramente viscoso tem-se:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1-\varepsilon)Q\mu v_f}{A\rho_p \varepsilon^3 d_p^2} \quad (2.27)$$

Outras correlações foram desenvolvidas e podem ser utilizadas para determinar a porosidade pelo método indireto como as equações de Kozeny-Carman, Rudnick-Happel, MacDonald e Endo.

A Equação de Kozeny-Carman, considera que o meio poroso pode ser representado por capilares, em que a superfície se iguala à superfície das partículas que compõem o meio, e fixando o volume do capilar ao volume de vazios do meio, desenvolveu a Equação (2.28):

$$\Delta P = \frac{18\mu_g v_f Q t}{A d_p^2 \rho_p C} + \frac{2K_{CK}(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.28)$$

em que, ΔP é a queda de pressão, μ_g é a viscosidade do gás, v_f é a velocidade superficial do fluido, Q é a vazão mássica de pó, d_p o diâmetro médio das partículas, ρ_p a densidade das partículas, C é o fator de correção de Cunningham, K_{CK} é uma constante empírica que pode assumir valores de 4,8 para partículas esféricas e de 5,0 para partículas irregulares (LUCAS, 2000).

Na Equação de Rudnick-Happel adotam-se algumas hipóteses, como: as partículas são esféricas, o volume da célula igual ao da partícula associada à porosidade do meio e o cisalhamento na interface entre células é nulo (AGUIAR, 1995). Assumindo essas hipóteses e considerando que os termos inerciais da equação de Navier-Stokes são desprezíveis, obtém-se uma correlação para a queda de pressão em função do tempo de filtração que permite determinar a porosidade da torta de filtração. A Equação (2.29) é dada por:

$$\Delta P = \left(\frac{2 + 2(1-\varepsilon)^{5/3}}{3 - 4,5(1-\varepsilon)^{1/3} + 4,5(1-\varepsilon)^{5/3} - 2(1-\varepsilon)^2} \right) \frac{18\mu_g v_f Q t}{A \rho_p d_p^2 C} \quad (2.29)$$

Na Equação de MacDonald considera-se a rugosidade das partículas. Tal equação foi estimada para partículas rugosas e partículas não rugosas conforme as Equações (2.30) e (2.31) (ROCHA, 2010):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180(1-\varepsilon)\mu_g v_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{4(1-\varepsilon)\rho_g v_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.30)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180(1-\varepsilon)\mu_g v_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,8(1-\varepsilon)\rho_g v_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.31)$$

A equação de Endo (1998) foi desenvolvida para determinar a porosidade das tortas de filtração levando em consideração a polidispersão das partículas e seu formato. A Equação (2.32) é dado por:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{180k(1-\varepsilon)\mu_g v_f Q}{\varepsilon^3 d_g^2 e^{(4 \ln 2 \sigma) A d_p}} \quad (2.32)$$

em que σ_g corresponde ao desvio padrão do diâmetro geométrico d_g das partículas e k é o fator de forma dinâmico das partículas. O fator de forma dinâmico é definido como a razão pela força de arraste na partícula, para determinada velocidade, e a força de arraste em uma esfera de mesmo volume e velocidade (DAVIES, 1979) e pode ser estimado pela Equação (2.33):

$$k = \frac{C_v}{C_{st}} \left(\frac{d_v}{d_{st}} \right)^2 \quad (2.33)$$

em que d_v corresponde ao diâmetro de uma esfera equivalente, d_{st} é o diâmetro de Stokes, C_v e C_{st} são os fatores de escorregamento de Cunningham para os diâmetros d_{sv} e d_{st} .

Na Tabela 2.3 apresenta um resumo dos parâmetros de projeto utilizados na operação filtração de gases e seus respectivos valores, segundo MATTESON (1987) *apud* SILVA (2008).

Tabela 2.3- Parâmetros de projeto mais utilizados na filtração de gases (MATTESON, 1987) apud SILVA (2008)

Velocidade do fluido	0,8 a 10 cm/s
Queda de pressão do tecido limpo	60 a 200 Pa
Queda de pressão máxima de operação	500 a 2500 Pa
Concentração de pó	0,1 a 100 g/cm ³
Massa de pó depositada por unidade de área	200 a 2000 g/m ²
Eficiência de coleta	99,90 a 99,99 %

2.7.5 - Forças de adesão

De acordo com Rumpf (1977) *apud* Felicetti (2004) a força de adesão acontece entre os corpos devido às forças de Van der Waals, forças eletrostáticas e capilar em que o domínio de uma ou várias destas forças dependem das condições ambientais de operação e das propriedades físico-química dos materiais em contato. Essas forças podem ser afetadas pelo tipo de material utilizado, pelo formato da partículas, pela aspereza da superfície, tamanho da partícula, umidade relativa do ar, tempo de contato e velocidade inicial de contato.

As forças de Van der Waals surgem porque o movimento aleatório dos elétrons, para qualquer tipo de material, produz áreas transitórias de cargas concentradas denominadas de dipolos que a qualquer instante induzem dipolos complementares no material vizinho e consequentemente, a produção de forças atrativas. Essas forças são inversamente proporcionais à distância de separação entre as partículas.

O cálculo para determinar as forças de Vand der Waals entre duas partículas de diâmetro d_1 e d_2 pode ser obtido pela expressão proposta por Hamaker (1937) dada pela Equação (2.34):

$$F_w = \frac{H(d_1.d_2)}{12a^2(d_1 + d_2)} \quad (2.34)$$

em que H é a constante de Hamaker que é da ordem de 10^{-20} a 10^{-19} Joules e específica para cada material, “a” é a distância de separação efetiva entre as duas partículas.

Segundo Faustino (2010), a distância “a” pode ser obtida através da Equação (2.35):

$$a = \sqrt{\frac{Hd_p}{12F_c}} \quad (2.35)$$

A Tabela 2.4 apresenta os valores de “a” encontrados por Faustino (2010) para partículas de concentrado fosfáticos aderidas em membranas de éster de celulose e em filtros de papel de celulose obtidos através da Equação (2.35).

Tabela 2.4: Valores de distância efetiva “a” entre partículas e substratos (FAUSTINO, 2010).

Substrato	Velocidade angular de compressão (rpm)	Diâmetro médio das partículas x 10 ⁶ (m)	Diâmetro de separação efetiva x10 ⁹ (m)
Membrana	500	17,75	1,74
		26,02	1,72
		48,01	1,70
		72,32	1,65
	1000	12,35	1,06
		34,34	0,92
		48,22	0,88
		69,94	0,84
Filtro de papel de celulose	500	16,05	1,7
		35,00	0,86
		46,09	0,84
	1000	61,81	0,76
		15,45	0,85
		24,71	0,51
		50,50	0,45

Para partículas de mesmo tamanho de diâmetro, d_p, são determinadas pela Equação (2.36).

$$F_w = \frac{Hd_p}{24a^2} \quad (2.36)$$

Para partículas com tamanho de diâmetros muito maior que o da outra ($d_2 \gg d_1$) a Equação (2.36) pode ser reduzida para Equação (2.37):

$$F_w = \frac{Hd_1}{12a^2} \quad (2.37)$$

em que d_1 é o diâmetro da partícula menor.

Na teoria de Rumpf (1962), quando as forças de separação impostas pela tensão normal obtêm os mesmos valores que as forças de adesão, alcança-se a resistência limite de um aglomerado. Assim, a tensão normal aplicada a um aglomerado de diâmetro d_p pode ser escrita pela Equação (2.38), em que F é a força média que atua nos pontos de contato e n é o número médio de contatos partícula-partícula por unidade de área numa seção transversal do aglomerado dada pela Equação (2.39).

$$\sigma^* = nF \quad (2.38)$$

$$n = 1,1(1 - \varepsilon)\varepsilon^{-1}d_p^{-2} \quad (2.39)$$

Para duas partículas de mesmo diâmetro, a força de adesão entre as duas partículas pode ser escrita através da Equação (2.39) e substituída na Equação (2.38), é possível determinar a tensão de ruptura do aglomerado através da Equação (2.40).

$$\sigma_{R-R}^* = 0,046 \frac{(1 - \varepsilon)H}{\varepsilon d_p a^2} \quad (2.40)$$

2.7.6 - Metodologia de Seville et al. (1989)

Seville et al. (1989) propuseram um método capaz de estimar a força de remoção das tortas de filtração, considerando que o comportamento do escoamento do gás no sentido reverso ao da operação de filtração, até atingir as condições críticas de remoção da torta apresenta um comportamento análogo ao da filtração. Assumindo-se que a ruptura da torta de filtração se dá

na interface torta-tecido (Lucas, 2000), tem-se que a Equação (2.17) pode ser reescrita na forma da Equação (2.41).

$$\Delta P_L = k_1 v_f + \Delta P_{cL} \quad (2.41)$$

em que ΔP_L é queda de pressão de limpeza, k_1 é a resistência específica do meio filtrante, v_f é a velocidade de limpeza do gás e ΔP_{cL} é a queda de pressão nas tortas de filtração em condições críticas de remoção.

A Equação 2.41 informa que a queda de pressão na limpeza varia linearmente com a velocidade de limpeza do gás, na qual a resistência específica do meio filtrante como coeficiente angular e queda de pressão em função da torta de filtração como coeficiente linear.

Dessa forma, definiu-se uma grandeza denominada de fração de massa retida γ_M dada pela Equação (2.42), em que W_R é a massa retida no meio filtrante após uma determinada velocidade de limpeza e W é a massa total da torta de filtração.

$$\gamma = \frac{W_R}{W} \quad (2.42)$$

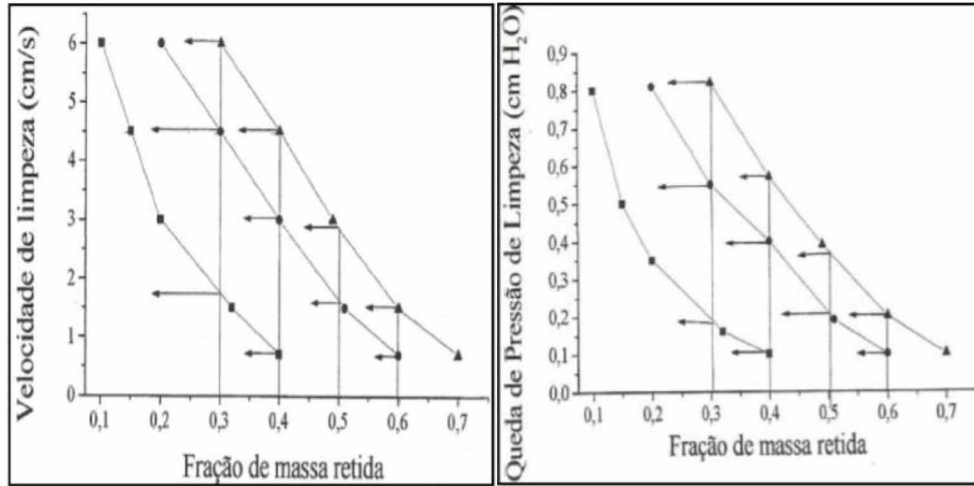
Assim, a aplicação do método de *Seville et al.*, (1989) se desenvolveu através de dados experimentais, como a massa de pó durante a filtração e massa de pó retida para cada velocidade de limpeza.

No primeiro procedimento, plota-se os valores de velocidade de limpeza em função da fração mássica de torta retida correspondente através da interpolação.

Numa segunda etapa, semelhantemente à primeira etapa, os valores de fração mássica calculados são plotados em relação a queda de pressão de limpeza.

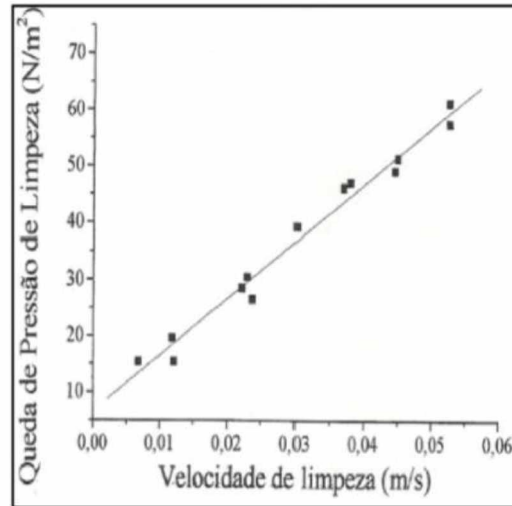
Na última etapa, plota-se os valores encontrados por interpolação nas etapas 1 e 2, queda de pressão de limpeza pela velocidade de limpeza através da técnica de regressão linear para garantir uma curva representativa de variação da queda de pressão de limpeza em função da velocidade de limpeza.

A Figura 2.18 mostra os procedimentos para a aplicação do método de *Seville et al.* (1989).



(1)

(2)



(3)

Figura 2.18: Método *SEVILLE* et al., (1989): (1) primeira etapa (2) segunda etapa (3) última etapa.

A força de adesão pode ser calculada através da Equação (2.43).

$$F_c = \sigma_R A \quad (2.43)$$

em que, F_c é a força de adesão na interface torta-tecido, a σ_R é a tensão de remoção da torta de filtração e A área de filtração.

2.8 – Trabalhos encontrados a literatura sobre Filtração de gases

Bakker et al., (1958) estudaram os efeitos da velocidade inicial de filtração e das vibrações na resistência da torta de filtração de esferas de poliestireno em água em três diferentes meios filtrante como poliestireno, nylon e níquel afim de obterem uma explicação qualitativa. Os experimentos foram realizados em três etapas, na qual a primeira etapa consistia em uma filtração sucessiva em que a suspensão aquosa passava por um recipiente contendo um agitador e uma bobina de aquecimento e fluía até a câmara de filtração. A segunda etapa consistia na re-filtração em que se removia as partículas finas do filtrado e a terceira etapa era a filtração com vibração por dois dispositivos. O primeiro era um sistema que rotacionava em torno de um eixo horizontal e o segundo era um motor de velocidade constante. Os resultados obtidos mostraram que, quanto à velocidade de filtração na resistência da torta, as diferenças observadas nas de poliestireno indicaram a existência de uma influência da tensão superficial líquido-sólido sobre a torta de filtração. Em relação ao efeito das vibrações no filtro verificaram-se que as vibrações não causaram alterações em sua resistência, porém nas tortas, as vibrações em geral, aumentaram a sua resistência. Quando combinou-se a filtração e a vibração, percebeu-se que o aumento da resistência por vibração era maior se a torta fosse formada a uma velocidade inicial baixa, resultando em uma maior resistência e que o ar sob o filtro provocava um pequeno aumento em sua resistência. Os autores concluíram que a resistência específica da torta aumentava com a vibração. O aumento da resistência da torta era maior com o aumento da frequência, amplitude e resistência original e que a possível explicação para esse comportamento está relacionada ao distúrbio de balanço entre as forças estabilizadoras e pressão na torta e do fenômeno de empacotamento das camadas das partículas. Apesar dos esforços, os autores concluíram também que os fenômenos que foram descritos não puderam ser explicados quantitativamente, ainda que tivessem resultados para isso, pois eles podem sofrer influências externas incontrolláveis ou mudanças experimentais, especialmente se as suspensões utilizadas forem compostas por partículas de grandes dimensões.

Zen'kovskaya (1993) estudou os efeitos da alta frequência de vibração em sistema de filtração em meio poroso e homogêneo. Os experimentos foram realizados em ordem cronológica em que o problema de filtração por convecção foi realizado em meio poroso saturado por um líquido incompressível viscoso com oscilações harmônicas ao longo de uma direção especificada. A partir dessa etapa, chegou-se a derivação das equações médias da filtração por convecção para uma região arbitrária, o equilíbrio e a estabilidade mecânica. A ação da alta frequência de vibração foi analisada e propôs uma justificativa matemática exata

do método para o problema de convecção. Os resultados mostraram que os efeitos da alta frequência de vibração foram confirmados experimentalmente em um estudo de convecção em um meio homogêneo e foi descoberto que para um líquido homogêneo, intensa vibração pode suficientemente suprimir completamente a convecção (estabilização completa). Os autores concluíram que os cálculos e experimentos foram suficientemente válidos para confirmar que a vibração por alta frequência pode ser usada como método em filtrações por convecção.

Moreira (1998) estudou a vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros manga em que determinou o grau de remoção de torta em função da frequência de vibração e amplitude do sistema para as faixas de 20- 35 Hz e 40 – 55 Hz. Os resultados mostraram que as frequências entre 20 e 35 Hz com vibração na vertical apresentaram menores graus de remoção e para as faixas entre 40 e 55 Hz a remoção era alta, pouco dependente da frequência e com movimentos mais circularizados. Verificaram que a queda de pressão residual não constitui num indicador confiável de grau de limpeza do filtro e que a forma da curva de filtração e sua evolução com os ciclos de limpeza constituem um indicador mais confiável e também que a remoção da torta é fortemente dependente do tempo de vibração, pois em condições de alta remoção, o desprendimento foi praticamente instantâneo e o tempo de vibração tendeu a aumentar com a atenuação das condições de remoção.

Wakeman & WU (2002) estudaram os efeitos da vibração em filtração e permeações de partículas micrométricas em meios filtrante afim de compreender os efeitos de diferentes condições de vibrações sobre as taxas de filtrado e permeação e como esses efeitos afetam na resistência e forma da torta. A metodologia experimental foi realizada em três etapas em que a primeira investigava a vazão do líquido no meio filtrante, o segundo conjunto investigava a formação e resistência da torta e a última etapa relacionava a resistência da torta e sua permeação. Para cada experimento, os autores fixaram as vibrações e acelerações. Os autores concluíram que a vibração do filtro causou apenas uma pequena mudança na resistência da torta e que a resistência da torta poderia ter sido reduzida substancialmente sob as condições corretas de vibração. Concluíram que a vibração pode aumentar a taxa de filtração, mas essa intensidade tem de ser maior que a aceleração crítica de vibração. A aceleração crítica está relacionada a frequência de vibração, o peso dos sólidos secos na torta e nas características dinâmicas do sistema de filtração. A aceleração crítica obtida durante a filtração é diferente das obtidas durante a passagem da permeação do fluido na torta já formada. Os autores informaram que, se a aceleração de vibração é menor que a aceleração de vibração crítica, a vibração não pode melhorar a taxa de filtração, mas irá diminuí-la.

Ni et al., (2006) desenvolveram um modelo computacional com o objetivo de simular a formação da torta de filtração e seu crescimento. Os autores chegaram a resultados em que o modelo não apenas gera informações detalhadas sobre a formação e crescimento da torta de filtração como também se pode avaliar o desempenho em diferentes condições, considerando presentes inúmeras forças, incluindo a gravidade, flutuação, arrastes de fluidos, forças de Van der Waals e outras que afetarão a embalagem, o fluxo e o comportamento do endurecimento da torta de filtração.

Krammer e Saleem (2007) estudaram os efeitos da velocidade de filtração e concentração de pó na formação da torta para filtros de mangas em escala piloto com limpeza por jato pulsante. A concentração de material particulado exerce pouca influência na operação de filtração a uma velocidade superficial de filtração constante. No entanto, a velocidade de filtração tem um efeito mais pronunciado em relação à concentração de pó na queda de pressão, na resistência específica da torta e a densidade. Os autores abordaram que o aumento da velocidade de filtração proporcionou maiores resistências específicas e densidades de tortas de filtração para concentrações de pó constantes e que o efeito da concentração de pó é pequeno na densidade e resistência específica da torta.

Chen e Hsiau (2009) estudaram a formação e o crescimento das tortas de filtração e desenvolveram um método experimental para melhor entendimento desse fenômeno, bem como um sistema *on-line* de medição de deslocamento de pressão para medir a espessura da torta de filtração. Altos valores de velocidades superficiais de filtração resultaram em um maior grau de compactação da torta de filtração, maior resistência específica da torta e maior eficiência de coleta de partículas e que a espessura da torta de filtração e a velocidade superficial de filtração muito influenciam no desempenho do filtro.

Tanabe (2011) analisou o comportamento de diferentes meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões. Verificou que as constantes de permeabilidade não apresentaram variações significativas com o aumento da queda de pressão no sistema e tenderam a um valor constante. Para uma mesma massa de pó coletada, a maior pressão absoluta no sistema proporcionou menor perda de carga no filtro. Verificou também que, o aumento da pressão resultou em tortas mais porosas e menos resistentes ao gás e uma maior eficiência fracionária dos filtros para partículas menores que 5 μm .

Choudhary e Dwivedi (2012) estudaram a filtração de gás por pulso de ar e verificaram os parâmetros velocidade de filtração, pressão do jato e a densidade do meio filtrante, analisando a queda de pressão em função do tempo de filtração. Observaram-se que a queda de

pressão residual aumentou durante os ciclos de filtração e que o aumento da queda de pressão foi lento no início da operação de filtração e mais rápido após um período de tempo.

Cirqueira (2013) investigou o desempenho dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso, através do estudo da eficiência de limpeza e da observação da regeneração dos tecidos. Constatou que o filtro de polipropileno apresentou maior permeação, maior resistência específica e maior eficiência de limpeza, comparada ao filtro acrílico para as mesmas condições operacionais. Observou também que o desempenho foi satisfatório para ambos os tecidos, que mostraram-se adequados para operações de filtração por pulso de ar reverso.

Arouca (2014) avaliou a influência da frequência de vibração perpendicular na formação da torta. Constatou-se que a frequência de vibração mecânica, concomitante ao processo de filtração, influenciou na estrutura de formação da torta de filtração. A vibração contribuiu na formação de tortas menos porosas e menos espessas, para os materiais particulados rocha fosfática virgem, moída e polvilho doce, aumentando os gastos energéticos. A força de adesão para partículas menores foi menor para o sistema com vibração mecânica.

Fane et al. (2014) compararam o efeito da vibração longitudinal e transversal de uma membrana de fibra oca submersa em um meio aquoso como forma de controlar a incrustação. Os resultados mostraram que a vibração transversal foi mais efetiva que a longitudinal em termos da redução da incrustação de resíduos até mesmo em uma baixa frequência, 1 Hz, o que pode ser devido às fronteiras de separação das camadas e associado aos fluxos secundários em volta da membrana circular do filtro pelas vibrações transversais. Um menor grau de folga das fibras confirmou reduzir ainda mais as incrustações e aperfeiçoar o desempenho da membrana com a vibração transversal em ambas as alimentações, devido ao movimento extra da lateral da fibra. Comprovou-se também que menores incrustações foram induzidas por uma alta densidade de empacotamento das fibras da membrana em vibrações transversais a altas amplitudes de vibração, o que implicou que houve mais colisões fibra-fibra com um posicionamento mais fechado das fibras pela vibração.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo 3 trata da descrição detalhada dos materiais utilizados para a execução da operação de filtração de gases e da metodologia e procedimentos utilizados para a obtenção de resultados.

3.1 – Unidade experimental

Os procedimentos experimentais de filtração de gases e limpeza do meio filtrante foram realizados no Laboratório de Processos de Separação (LabSep) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A Figura 3.1 apresenta o sistema experimental adaptado para a realização da filtração de gases sob influência da vibração mecânica na direção longitudinal e é constituído pelos seguintes dispositivos:

- Compressor radial do tipo WEG *Plus* da marca IBRAM de 5,5 HP (7,5 cv);
- Comando de válvulas gaveta do tipo DN 50 da marca Deca de 2 polegadas de diâmetro para ajuste de vazão de ar;
- Placa de orifício de aço inoxidável para determinação da velocidade do ar;
- Manômetros diferenciais utilizando água como líquido manométrico conectados à placa de orifício e à caixa de filtração e suporte;
- Caixa de filtração com área de filtração de 152,80 cm² e suporte;
- Dois motores excêntricos com 243 W de potência para vibração;
- Dois inversores de frequência para controle da frequência de vibração;
- Colunas de desumidificação composta por sílicas em gel;
- Caixa acrílica de desumidificação composta por um motor vibratório, prato giratório, cone de alimentação de pó, psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido,
- Linhas de ar comprimido conectadas às colunas de sílicas em gel;
- Filtro – processador de ar e regulador de pressão da marca ARPEX com entrada de 5/16 polegadas BSP fêmea e duas saídas de ar reguláveis de 5/16 polegadas BSP macho e manômetro de 175 lbf/pol².

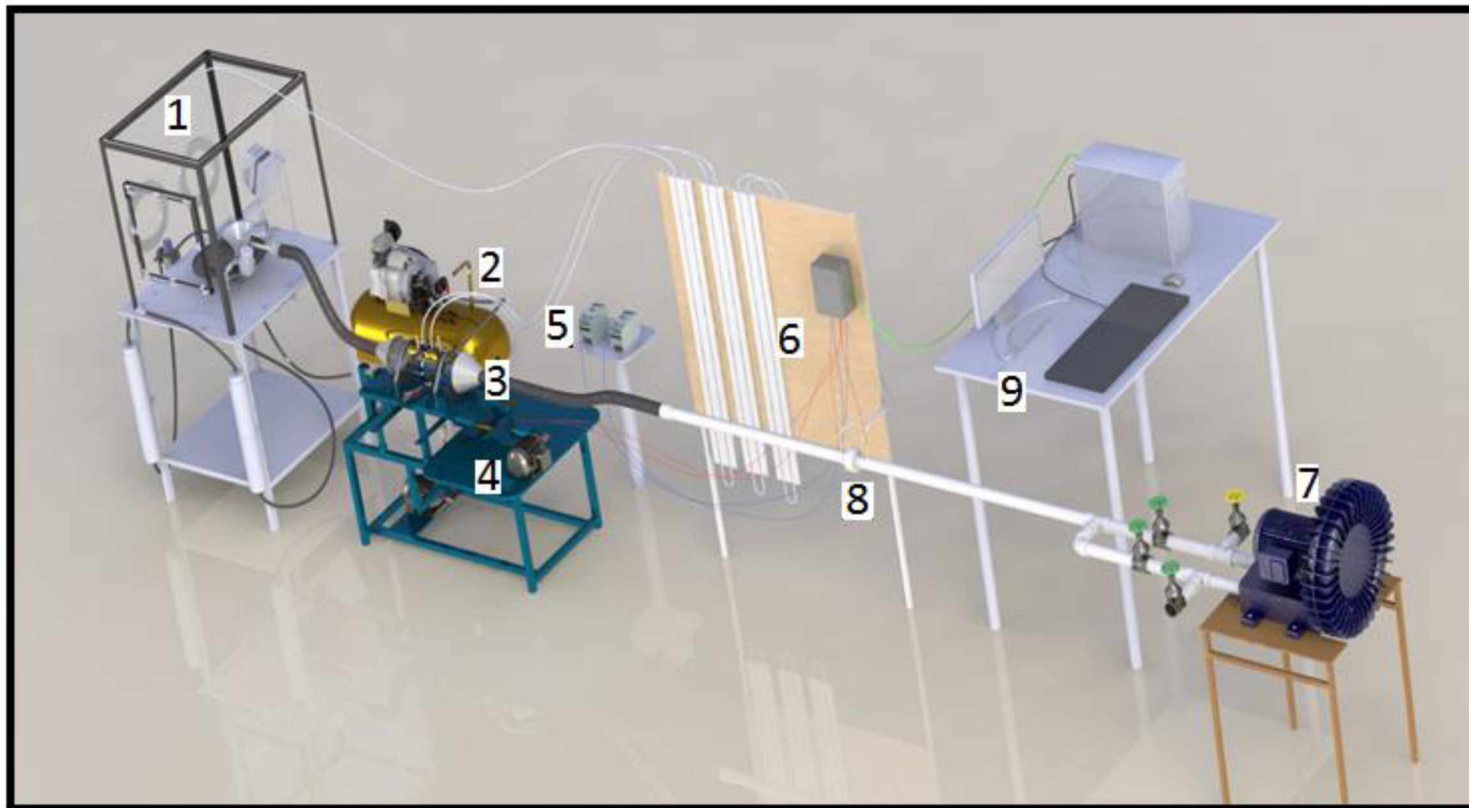


Figura 3.1: Unidade experimental.

(1) Caixa de alimentação de pó; (2) Compressor de ar; (3) Câmara de filtração; (4) Motores excêntricos; (5) Inversores de frequência; (6) Manômetros de tubo em U; (7) Soprador de ar; (8) Placa de orifício e (9) Sistema de aquisição de dados.

3.2 – Sistema de alimentação de pó

O sistema de alimentação de pó na linha de filtração (gerador de pó) é totalmente vedado para eliminar qualquer existência de perda de carga ou vazamento do interior da caixa de acrílico. Essa caixa de alimentação era composta por um prato giratório de aço inoxidável de 24,5 cm de diâmetro com sulcos com seção semicircular, no qual os materiais particulados eram depositados através de uma luva sintética que permitia o manuseio do material particulado no prato giratório. A Figura 3.2 representa o sistema de alimentação de pó.

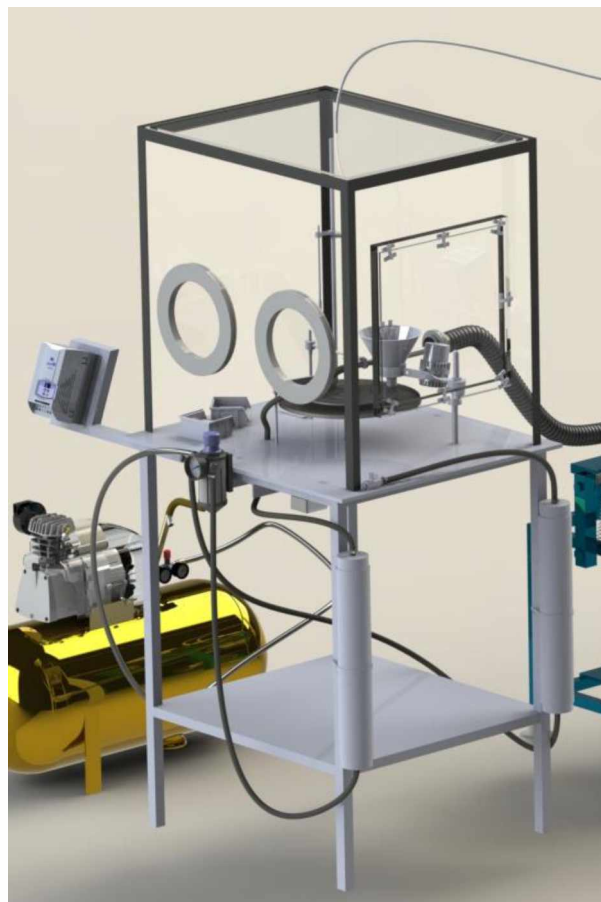


Figura 3.2: Sistema de alimentação de pó.

Havia um sistema de descarga que permitia a deposição de material particulado no prato giratório, constituído por um cone de alimentação do pó, motor vibratório, nivelador de pó, um sugador de pó do tipo Venturi, uma válvula reguladora de pressão ou filtro regulador (ar comprimido), um coletor para recuperação do pó em excesso no sulco do prato giratório, duas colunas de tubo de PVC contendo sílica gel, controlador de velocidade de rotação do prato ou

inversor de frequência, um psicrômetro de bulbo úmido, potes com sílicas em gel e uma caixa acrílica de 80 cm de altura, 62,5 cm de largura e 62,5 cm de comprimento.

A Figura 3.3 mostra-se com mais detalhes, os componentes do sistema de alimentação de pó para a caixa de filtração.

1. Inversor de frequência;
2. Filtro processador de ar;
3. Prato giratório e Psicrômetro de bulbo seco e úmido;
4. Colunas de sílica em gel;

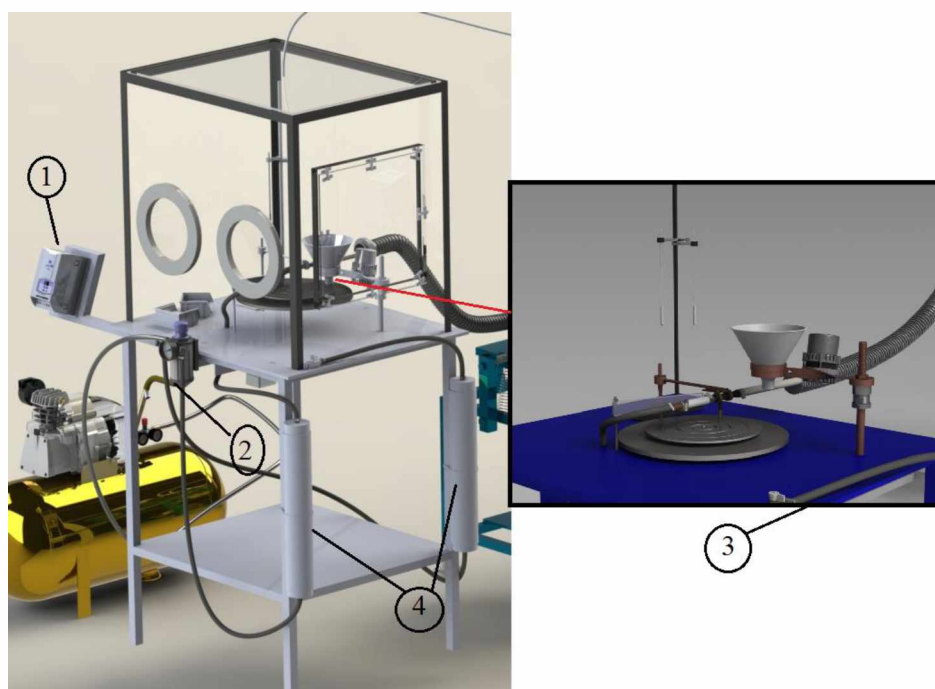


Figura 3.3 Sistema de alimentação de pó especificado.

O ar de sucção do material através do tubo de Venturi era proveniente do compressor de ar era conectado às colunas de sílicas em gel para a retirada da umidade da corrente gasosa, cuja vazão do ar era controlada pelo filtro regulador. Alimentava-se o ar tanto para a sucção do material particulado quanto para o interior da caixa no controle de pressão interna, com a função de reduzir a umidade relativa interna para valores abaixo de 20%, permitindo que o material particulado fosse direcionado ao meio filtrante com baixa umidade e garantindo maior segurança nos resultados.

A medida da umidade relativa do ar era feita utilizando um higrômetro no meio externo e um psicrômetro de bulbo úmido no interior da caixa de acrílico em que foram realizados testes

de comparação de temperatura e umidade anteriormente aos experimentos para verificar a variação de um equipamento ao outro.

Para permitir melhor deslocamento do material pulverulento, fixou-se um motor vibratório ao cone, evitando um acúmulo e aglomeração das partículas no cone, e, através de um nivelador sobre o prato era possível garantir o total preenchimento do sulco semicircular do prato giratório com o aerossol, garantindo uma alimentação com vazão mássica constante direcionado para a caixa de filtração.

3.3 - Caixa de filtração

Para que ocorresse a operação de filtração era necessário utilizar uma caixa cilíndrica composta por um suporte de apoio para o meio filtrante e tomadas de pressão antes e após o filtro conectados a um manômetro tubo em U e uma válvula conectada a uma das partes cilíndricas, cuja função era retirar o material particulado durante a operação de filtração de forma ininterrupta.

Este equipamento era constituído por dois cilindros de acrílico, cada parte media 20,5 cm de comprimento e com uma área livre para filtração de 152,8 cm². O tecido era colocado perpendicularmente e parafusado entre as duas molduras de acrílico acondicionadas entre os dois cilindros, conforme a Figura 3.4.

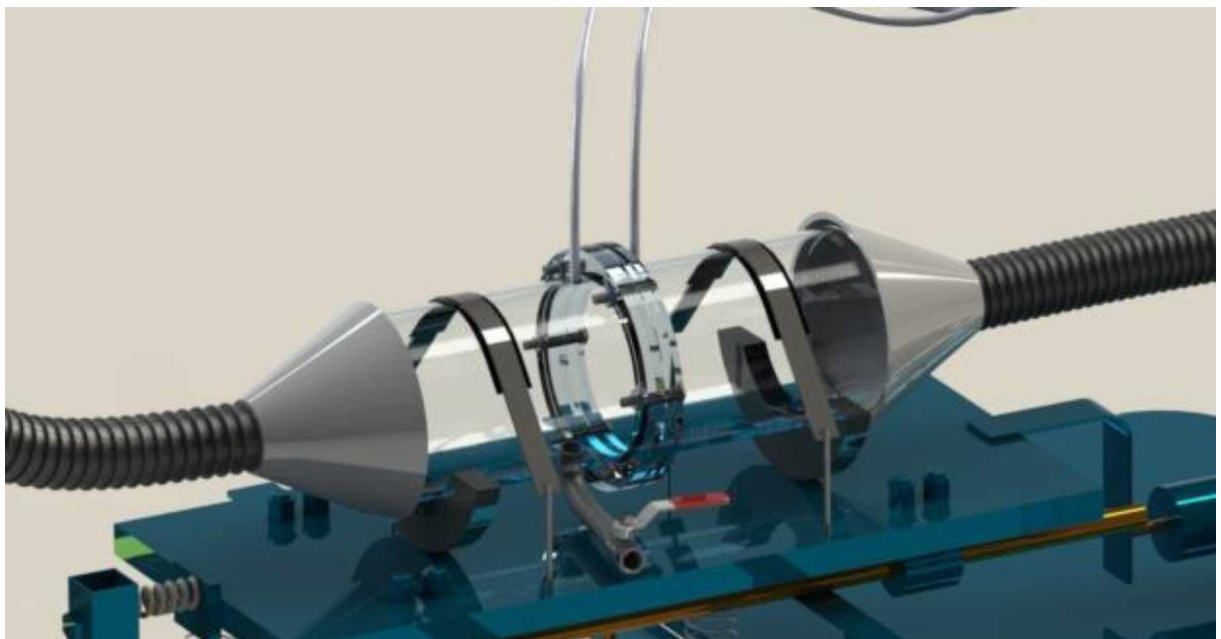


Figura 3.4: Esquema da caixa de filtração, fixação do meio filtrante e tomada de pressão.

Para estabelecer a conexão entre as tampas e as molduras e manter o filtro fixo dentro da caixa eram utilizados 6 parafusos de ¼ de polegada para a montagem e desmontagem do filtro durante os experimentos.

A câmara de filtração possuía duas tampas cônicas com dutos de 2 polegadas em suas extremidades, uma conectada ao gerador de pó ou caixa de alimentação e outra conectada a tubulação de direcionamento do fluxo conectada ao soprador.

No suporte da caixa de filtração eram acoplados dois motores excêntricos com o objetivo de aplicar vibração mecânica ao sistema durante a operação de filtração em diferentes faixas de frequência de vibração controladas através de dois inversores de frequência da marca *WEG*, série *CFW-10*.

O acionamento do motor causava um movimento oscilatório na direção horizontal na caixa de filtração através de uma haste interior central de apoio e conectada a uma outra haste que mantinha contato com o suporte da bancada.

3.4 - Direcionamento do escoamento

O escoamento de ar se dava através da caixa de filtração, que realizava as funções de sucção do gás no processo de filtração e, também, de soprar o gás no processo de limpeza. Era usado um soprador do tipo *WEG Plus* da marca *IBRAM* com 5,5 HP (7,5 cv). Em conexão com o soprador foi utilizado um tubo de PVC de 2 polegadas conectado a 4 válvulas do tipo gaveta, também de 2 polegadas de diâmetro, que possibilitava o controle do fluxo de ar.

Na tubulação de PVC, entre a caixa de filtração e as válvulas, colocou-se uma luva de união de 2 polegadas com uma placa de orifício previamente calibrada no seu interior para a determinação da velocidade do ar. Tomadas de pressão a jusante e a montante da placa de orifício foram colocadas de modo a propiciar medidas da velocidade de filtração com o auxílio de um manômetro tipo U.

3.5 - Medição de vazão e queda de pressão

A queda de pressão total no filtro nas operações de filtração e limpeza era medida por um manômetro diferencial do tipo U, que usava como fluido manométrico a água. As tomadas de pressão eram localizadas na entrada e saída do filtro posicionado na caixa de filtração. A determinação da vazão do gás nesses processos foi realizada através de uma placa de orifício

conectada ao manômetro do tipo U localizado entre a saída da caixa de filtração e do soprador, conforme já abordado.

3.6 - Medição da umidade

A umidade relativa do ar no interior da caixa de acrílico era medida utilizando um psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido composto por dois termômetros previamente calibrados fixados sobre um mesmo suporte e presos por garras.

A falta de controle da umidade relativa do ar provocava aglomeração das partículas do pó utilizado sobre a superfície do tecido, fenômeno denominado de empastamento, resultando em maior obstrução da passagem do gás, devido aumento da resistência específica da torta e dificuldade de limpeza (TOGNETTI, 2007) e (BARROS, 2010).

3.7 - Outros itens

Além dos equipamentos mencionados anteriormente, outros materiais e ferramentas foram utilizados como placas planas de aço inoxidável com orifício central, dessecadores de vidro, estufa de secagem sem circulação de ar da marca *MedClave* modelo 5, balança analítica com 4 casas de precisão da marca *SHIMADZU* modelo AY220, cronômetro digital da marca *CRONOBIO SW 2018* para medição do tempo de filtração e carta psicrométrica.

3.8 - Materiais particulados

Para a operação de filtração de gases com vibração mecânica longitudinal ao fluxo gasoso foram utilizados três distintos materiais particulados. Os materiais particulados foram a rocha fosfática moída, o polvilho doce e o talco puro.

A caracterização dos materiais particulados foi realizada em relação ao cálculo da densidade, determinação da distribuição granulométrica e análise qualitativa da morfologia das partículas.

Os três materiais particulados foram misturados e quarteados separados e manualmente para serem analisados no *Malvern Mastersizer* para determinação da distribuição granulométrica das partículas, como diâmetro médio volumétrico e diâmetro médio de *Sauter* através da difração a laser. A densidade dos materiais foi obtida por picnometria a Hélio, no equipamento *ACCUPYC 1330*, da *Micromeritics*.

As imagens foram obtidas no Laboratório de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química - FEQUI/UFU através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca Carl Zeiss, modelo EVO MA10.

3.9 - Meio filtrante

Para os ensaios de filtração e limpeza utilizou-se o tecido empregado na fabricação de filtros de mangas industriais, fornecido pela empresa fabricante Gino Cacciari Ltda, localizada na cidade de São Paulo (SP).

O tecido utilizado era constituído por acrílico, o qual passou por tratamentos de chamuscagem e calandragem em um de seus lados, com o intuito de facilitar o desprendimento das tortas de filtração durante o processo de limpeza.

Os tratamentos citados foram realizados e as informações apresentadas na Tabela 3.1 referentes às características do meio filtrante acrílico foram fornecidas pelo próprio fabricante.

Tabela 3.1- Características e especificações do meio filtrante fornecido pela Gino Cacciari Indústria e Comércio de Filtros de Tecidos Ltda.

Caracterização	Acrílico
Produto	7002AC
Fibra	100% Acrílico
Cor	Branco natural
Contextura	Agulhado
Espessura	2,2 mm
Peso	550 g/m ²
Densidade	0,25 g/cm ³
Volume de Poros	82%
Densidade específica	1,16

A estrutura superficial do tecido acrílico foi fotografada utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, da marca *Carl Zeiss*, modelo *EVO MAIO*, e pode ser vista através da Figura 3.5.

Através da Figura 3.5, pela microfotografia, pode-se verificar que o tecido acrílico apresenta uma estrutura superficial fechada e emaranhada e com alto número de pontos quentes (hot spots), resultantes dos processos de calandragem e chamuscagem, na qual as fibras da superfície são fundidas pelo calor do tratamento, resultando em pontos fechados na superfície do tecido.

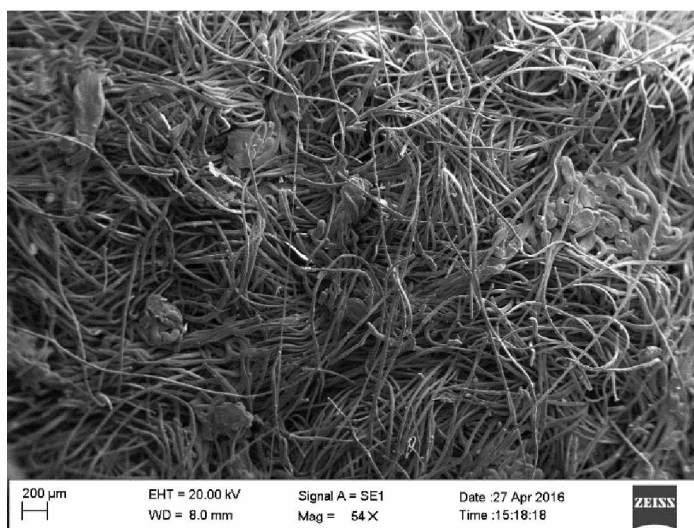


Figura 3.5– Estrutura superficial do meio filtrante acrílico.

3.10 - Calibração do gerador de pó

A calibração do prato giratório foi feita através da coleta de material particulado colocado nos sulcos do prato para a uma determinada rotação, com o intuito de mensurar a vazão de alimentação para os diferentes materiais particulados.

Para a calibração do prato giratório, foi necessário utilizar sacos descartáveis de aspirador de pó e um cronômetro da marca *CRONOBIO SW 2018*. As velocidades de rotação do prato correspondiam a 5%, 10%, 15%, 20% e 25% da máxima velocidade de rotação do prato giratório.

Para uma volta do prato giratório e para cada velocidade de rotação do prato, anotava-se em uma tabela, os valores correspondentes à: 1) massa do saco vazio, 2) massa do saco + pó, 3) massa do pó coletada, 4) tempo para uma rotação e 5) vazão de alimentação.

Para a realização dos testes experimentais foi realizada a calibração do prato giratório e da vazão de sucção para os três materiais particulados afim de garantir a mesma vazão ou

valores muito aproximados. A vazão mássica média de alimentação foi de 0,183 g/s com rotação do prato giratório de 20%, para o polvilho foi de 14,44% e para o talco foi de 14,52%.

3.11 - Metodologia experimental

Para a realização de um teste experimental era necessário fazer a filtração de gás até atingir a queda de pressão máxima estabelecida e em seguida fazer a limpeza do meio filtrante. Esse procedimento caracterizava um ciclo de filtração de gases.

Antes do início dos ensaios de filtração, o material particulado e a sílica gel eram, anteriormente, colocados na estufa por um período aproximado de 24 horas para a secagem, a 105° C para a desumidificação do material.

Após esse período, os materiais eram retirados da estufa e colocados em um dessecador até que esfriassem. A sílica gel era colocada nas colunas desumidificadoras e acopladas ao sistema de alimentação de pó para que, em seguida, o nível desejado de umidade relativa do ar no interior da caixa de acrílico fosse atingido. O valor da umidade relativa no ar, do início dos testes foi estabelecido como menor que 20% para evitar o empastamento no meio filtrante.

A umidade relativa do ar no interior da caixa era atingida utilizando ar comprimido controlado manualmente através de um filtro processador de ar e regulador de pressão que era conectado aos dois desumidificadores com o intuito de garantir a entrada de ar praticamente seco no interior da caixa de acrílico.

Uma das extremidades da caixa de filtração era desconectada de forma que permitisse a saída do ar no interior da caixa de acrílico. Utilizavam-se também potes de sílicas em gel no interior da caixa de acrílico para auxiliar na rápida redução da umidade interna, que era mantida entre 10 e 20%. A medida de umidade era obtida com o auxílio do psicrômetro de bulbo seco e úmido presente no interior da caixa. Através da diferença de temperaturas dos termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido era determinada a umidade relativa do ar com o uso de uma carta psicrométrica.

O meio filtrante acrílico era cortado em seção circular com as dimensões compatíveis com a caixa de filtração. Pesava-se o meio filtrante em uma balança analítica e fixava-se na caixa de filtração através de parafusos. A vedação da caixa era dada por um perfil de borracha entre as duas partes cilíndricas da caixa.

Fixava-se as partes cilíndricas da caixa de filtração à base da bancada por uma haste de metal flexível e ajustava-se os parâmetros e valores do inversor de frequência para a vibração mecânica desejada.

Após todos os ajustes dos parâmetros necessários para o início dos testes experimentais, principalmente a umidade relativa interna alcançada na caixa de alimentação, o material particulado era retirado do dessecador e transportado para o gerador de pó. Acionava-se o motor vibratório e o pó era colocado no cone de alimentação agitado pelo motor até que preenchesse todo o sulco semicircular do prato. Este, previamente calibrado para garantir a mesma alimentação de pó em todos os ensaios realizados a uma velocidade de rotação controlada através de um inversor de frequência em 20% de sua capacidade.

Fechava-se parcialmente o filtro processador de ar e controlador de pressão que mandava ar para a caixa de acrílico para o controle da umidade interna, acionava-se o soprador e controlava a velocidade de filtração através do comando de válvulas. A velocidade de filtração utilizada foi de 10 cm/s. Logo, abria-se a saída de ar do filtro processador de ar conectado ao desumidificador de acesso ao tubo de Venturi para sucção do pó no prato.

Após controlar a velocidade de filtração de interesse utilizando uma placa de orifício previamente calibrada acoplada ao manômetro tubo em U, o prato giratório, o cronômetro e a vibração mecânica de interesse eram acionados, simultaneamente. A faixa de frequências da unidade experimental variava de 3 a 19 Hz fora o sistema estático (f: 0 Hz).

A máxima frequência adotada para os experimentos foi de 19 Hz, com o intuito de preservar a estrutura da caixa de filtração, cujo material era de acrílico. Logo após, caracterizaram-se as frequências em faixa baixa (5, 6 e 7 Hz), média (12, 13 e 14 Hz) e alta (17, 18 e 19 Hz) para serem testadas.

Nos testes com vibração mecânica, o motor excêntrico era acionado através de um inversor de frequência logo após a velocidade de filtração utilizada ser atingida. O pó sugado pelo tubo de Venturi era disperso na linha que o levava até a caixa de filtração através da sucção do soprador. A operação de filtração era interrompida após atingir a queda de pressão máxima pré-estabelecida, com a interrupção da sucção do Venturi, desligamento do soprador, do prato giratório e da vibração mecânica no mesmo instante.

A unidade experimental era composta por três postos de trabalho: caixa de alimentação, caixa de filtração e comando de válvulas. Era fundamental ter um responsável para cada posto de trabalho. Na caixa de alimentação, um era responsável em alimentar o material particulado para o prato giratório e controle da pressão interna da caixa de alimentação e sucção do pó. Na caixa de filtração, um outro era responsável pela medição da variação da queda de pressão no meio filtrante com o tempo, em um manômetro de tubo em U, além de desligar a vibração mecânica e o soprador quando a pressão máxima fosse atingida. Um terceiro era responsável em manter a velocidade de filtração constante através do comando de válvulas.

Em seguida, retirava-se cuidadosamente, o meio filtrante com a torta de pó formada, limpava-se a caixa de filtração e colocava-se o tecido com a torta na caixa de acrílico e fazia-se a limpeza do meio filtrante.

Na operação de limpeza do meio filtrante, utilizou-se o mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso, em que consiste na passagem de fluxo gasoso no sentido inverso ao da filtração.

As velocidades de limpeza utilizadas foram de 7, 11 e 15,5 cm/s. Esses valores encontram-se na faixa de valores de trabalhos na literatura, tais como Tognetti (2007), Tanabe (2008), Fargnoli (2010), Nunes (2011) e Arouca (2014), além de que, esses valores estão de acordo com a capacidade do sistema. Essas velocidades de limpeza foram mantidas constantes durante 60 segundos, sendo que TIENI (2005) constatou que, após esse tempo de limpeza, não há mais desprendimento da torta da filtração.

Para cada velocidade de limpeza, retirava-se o meio filtrante e pesava-se o seu material removido e o seu material retido, sendo o material removido era coletado por uma folha de massa conhecida. Dessa forma, pela diferença entre as massas dos materiais retido e removido era possível conhecer as frações de massa de pó retida e de massa de pó removida para cada velocidade de limpeza.

Tais resultados possibilitaram a determinação das forças de adesão de acordo com a metodologia desenvolvida por *Seville et al.*, (1989) para cada frequência de vibração utilizada e para o sistema estático. Realizaram-se réplicas em todos os experimentos. Os valores da velocidade de filtração e limpeza foram adotados de acordo com as características da unidade experimental e de trabalhos encontrados na literatura estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Valores de velocidades utilizadas nas operações de filtração de gás e limpeza do meio filtrante.

Tecido	Pó	Velocidade de Filtração (cm/s)	Velocidade de Limpeza (cm/s)	$\Delta P_{máx}$ (cmH₂O)	Mecanismo de Limpeza	Umidade Relativa do Ar (%)
Acrílico	Rocha Fosfática Polvilho doce Talco puro	10	7, 11 e 15	100	Fluxo de Ar Reverso	< 20

O valor da velocidade de filtração está de acordo com os parâmetros de projeto mais utilizados em filtração de gases, segundo Mattenson (1987), cuja velocidade do fluido deve

estar entre 0,8 e 10 cm/s. Tanto os valores de velocidade de filtração quanto de velocidades de limpeza foram baseados nos trabalhos de Tieni (2005), Togneti (2007), Azevedo (2009), Nunes (2011) e Arouca (2014).

A unidade experimental passou por uma etapa de automação em que foi possível a realização dos testes experimentais sem a necessidade de colaboradores nas estações de trabalho.

3.12 - Metodologia para determinação da força de adesão – Seville et al. (1989).

A tensão de remoção da torta no meio filtrante era calculada através da força de adesão por unidade de área. Era determinada pelo método desenvolvido por *Seville et al.*, (1989), através da grandeza denominada de fração de massa retida na torta (γ), que foi determinada pela relação da massa de pó retido no meio filtrante após as velocidades de limpeza adotadas (W_R) pela massa acumulada por unidade de área. (W).

Após cada experimento com a velocidade de limpeza aplicada por fluxo de ar reverso, pesava-se o filtro e media-se a quantidade de massa retida no tecido e a massa removida, e determinava-se a fração de massa retida para cada velocidade de limpeza.

Os valores das velocidades de limpeza foram plotados em função das frações de massa retida correspondentes, obtendo curvas para cada sistema de filtração adotado. Curvas de queda de pressão na limpeza em função das frações de massa retida também foram obtidas com as respectivas velocidades de limpeza.

Através da interpolação dos gráficos de queda pressão na limpeza e velocidade de limpeza em função da fração de massa retida, construiu-se o gráfico de velocidade de limpeza em função da queda de pressão de limpeza.

Um tratamento estatístico por regressão linear das curvas representativas da variação queda de pressão em função da velocidade de limpeza foi realizado e apresentado em forma de $Y=A+BX$.

Pelo método de Seville et. al (1989), o coeficiente angular da reta representado pela letra B corresponde à resistência específica do filtro e o coeficiente linear representado pela letra A consiste na tensão de remoção ou ruptura da torta e corresponde à força de adesão por unidade de área.

3.13 - Ciclos de filtração

Adotando-se o procedimento de formação e remoção das tortas de filtração, estudou-se a influência dos ciclos de filtração tanto para o sistema estático quanto para o sistema submetido às vibrações mecânicas, para todos materiais particulados. Um ciclo de filtração consistia na execução do procedimento geral de filtração e limpeza do meio filtrante, porém, utilizou-se a velocidade de limpeza de 15,5 cm/s, sendo que, de acordo com Togneti (2007), as maiores velocidades de limpeza proporcionam maior regeneração do meio filtrante e, consequentemente, menor perda de carga residual.

As operações de filtração e limpeza eram realizadas até completarem 5 ciclos de filtração para cada frequência adotada. Ao término de cada ciclo conhecia-se a massa de pó removida, a massa de pó retida, massa da torta de filtração (massa de pó removida + massa de pó retida), tempo de filtração e queda de pressão de limpeza no meio filtrante. Foi feito um teste de 5 ciclos para o sistema estático e um teste de 5 ciclos para cada frequência de vibração mecânica adotada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais obtidos na caracterização dos materiais particulados e nos ensaios de filtração realizados em relação à porosidade das tortas de filtração, da resistência específica das tortas, das curvas de filtração, espessura da torta e da força de adesão para cada material particulado e para os sistemas com e sem efeito de vibração.

Para a realização dos ensaios de filtração e avaliação das variáveis citadas foram realizados testes com o meio filtrante de acrílico (discos circulares com área de 152,80 cm²), utilizando o ar comprimido como fluido gasoso. Adotaram-se alguns valores para as variáveis de velocidade de filtração, de limpeza e queda de pressão no meio filtrante de acordo com diversos trabalhos de filtração de gases encontrados na literatura, visto que, os parâmetros industriais adotados são completamente diferentes, conforme pôde ser visto na Tabela 2.3.

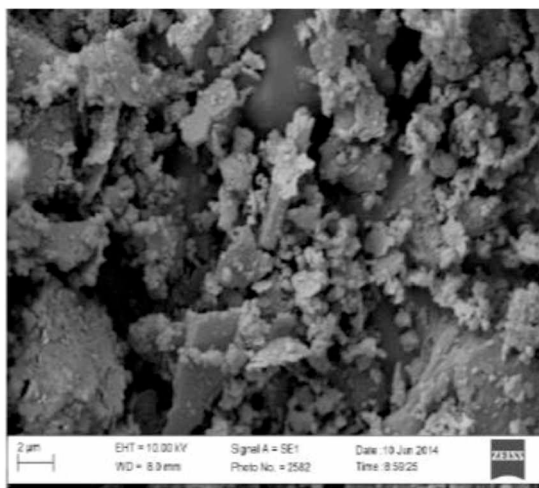
Outro motivo levado em consideração para a escolha dessas variáveis está relacionado à calibração do sistema quanto a leitura de queda de pressão e velocidade de filtração e limpeza possíveis de serem alcançadas com as condições operacionais na unidade experimental.

4.1 – Caracterização dos materiais particulados

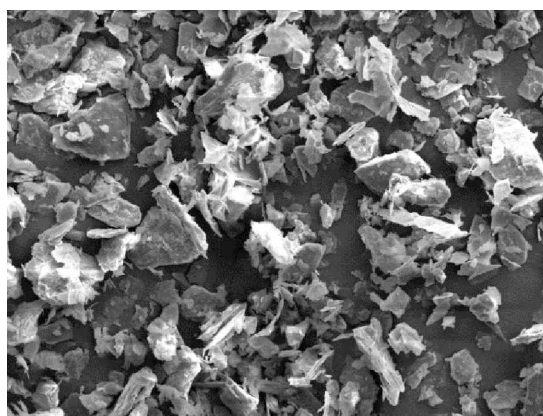
A Figura 4.1 mostra exemplos de imagens dos materiais particulados, obtidas pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) na qual foram analisadas de forma qualitativa por meio da observação e descrição das partículas com auxílio do *software Image J*.

Pode-se perceber que as formas das partículas são distintas entre si. Observa-se que o polvilho doce é o material que mais se aproxima do formato esférico, sendo que a maioria se aproxima dessa forma. O talco puro e a rocha fosfática moída apresentam formatos bastante irregulares.

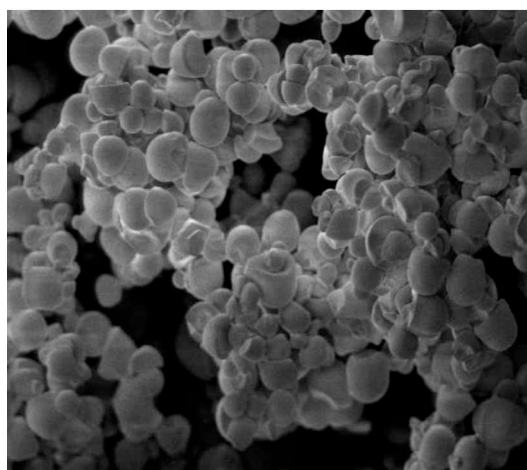
A caracterização do formato das partículas de polvilho doce, talco puro e rocha fosfática moída em relação a circularidade foi de 0,98, 0,67 e 0,60, respectivamente. A circularidade quantifica o quanto o formato da partícula projetada se aproxima de um círculo perfeito. Pode ser determinada pela relação entre o perímetro de um círculo, de mesma área da partícula de interesse dividido pelo perímetro da imagem da partícula. A circularidade varia entre 0 e 1 sendo a 1 para o círculo perfeito.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.1: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da (a) rocha fosfática, (b) talco puro e (c) polvilho doce.

4.1.1 - Rocha fosfática moída

Um dos materiais particulados utilizados para a execução dos experimentos foi a rocha fosfática disponibilizada pela empresa Vale Fertilizante, localizada na cidade de Patos de Minas – MG. Esse material foi escolhido por apresentar compatibilidade com a unidade experimental de filtração de gases, na qual o permite ser arrastado pela corrente gasosa na velocidade de filtração requerida, sem que se acumule no interior da tubulação e, também, por ter sido utilizado em diversas referências bibliográficas em filtração de gases, como por exemplo: Fagnoli (2010), Rocha (2010), Nunes (2011), Arouca (2014) entre outros.

A Figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica da rocha fosfática moída nas tortas de filtração e na alimentação, conforme a análise realizada no *Malvern Mastersizer*. O modelo de distribuição de partículas *Rosin-Rammler-Bennett* (RRB).

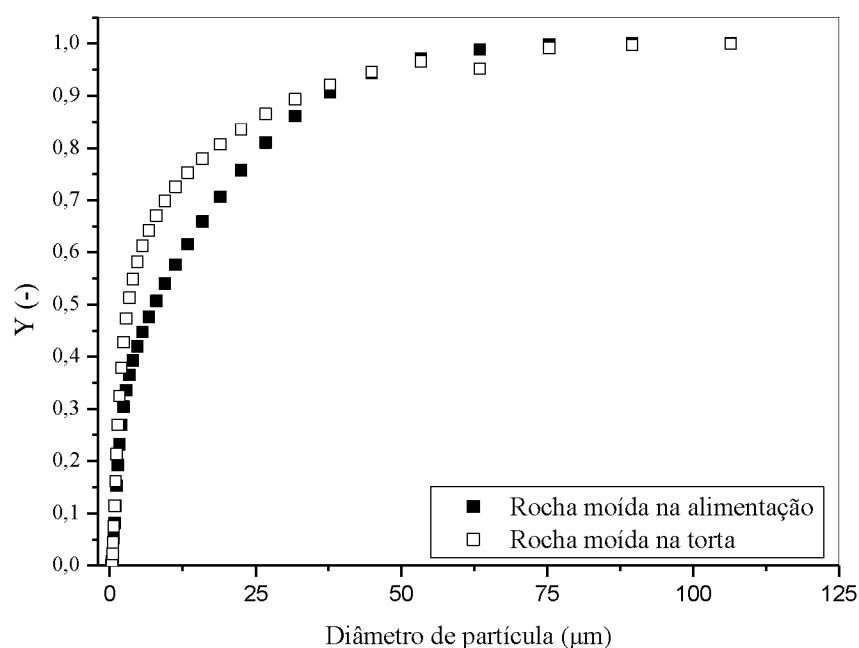


Figura 4.2: Distribuição granulométrica média da rocha fosfática moída nas tortas de filtração.

O diâmetro médio definido das partículas e utilizado nos cálculos de porosidade das tortas de filtração foi o diâmetro médio de *Sauter* que corresponde ao diâmetro da esfera que possui a relação entre o volume e a área superficial igual ao da partícula. O diâmetro médio de *Sauter* monitora a proporção de partículas finas presentes na distribuição, ao contrário do

diâmetro médio volumétrico que é mais sensível às partículas com diâmetros maiores na distribuição granulométrica (MALVERN MASTERSIZER, 2012).

O aumento da espessura da torta permite a captura de partículas mais finas, uma vez que, as partículas maiores sofrem influência da ação da gravidade, depositando no interior da câmara de filtração.

A Tabela 4.1 representa os diâmetros encontrados para as partículas de rocha fosfática moída, diâmetro médio de *Sauter* e diâmetro médio volumétrico como também o fator de forma dinâmico (k) obtido pelo uso da Equação (2.32).

Tabela 4.1: Caracterização da rocha fosfática moída.

Caracterização	D (3,2) (μm)	(D4,3) (μm)	Densidade ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
Alimentação	2,681	14,028	
0 Hz	2,253	10,945	
5 Hz	2,072	10,493	
6 Hz	2,062	10,017	
7 Hz	2,076	12,027	
12 Hz	2,064	11,782	3055 \pm 0,7
13 Hz	2,049	11,782	
14 Hz	1,986	11,477	
17 Hz	1,957	9,763	
18 Hz	2,075	12,017	
19 Hz	1,919	10,036	

4.1.2 - Talco Puro

O material particulado talco puro foi adquirido através da empresa LabSynth Produtos para Laboratórios Ltda, lote 53487AP, da cidade de Diadema – SP.

O talco puro foi determinado para os testes experimentais devido possuir baixo teor de umidade, baixa condutividade térmica, baixa condutividade elétrica, alta resistência ao choque térmico e devido à sua ampla aplicação em diversos ramos como indústrias veterinárias, cosméticas, agrícolas, farmacêuticas e tintas (LIMA, 2015)

Outro motivo para a escolha desse material está relacionado à estruturação da torta de formação durante os ensaios. Segundo Lucas (2000) e Fagnoli (2010), ao utilizarem o talco como material particulado em filtração de gases encontraram valores médios de porosidade das tortas maiores que os encontrados para a rocha fosfática. Dessa forma, devido a formação de tortas mais porosas esperava-se que a torta de filtração formada com efeito de vibração apresentasse menor resistência em sua remoção.

O talco puro foi misturado e quarteado manualmente para ser analisado no *Malvern Mastersizer*. Sua densidade foi obtida por picnometria a Hélio, no equipamento *ACCUPYC 1330*, da *Micromeritics*.

A Figura 4.3 representa a distribuição granulométrica do talco nas tortas de filtração conforme a análise realizada no *Malvern Mastersizer*. O modelo de distribuição de partículas *Rosin-Rammler-Bennett* (RRB).

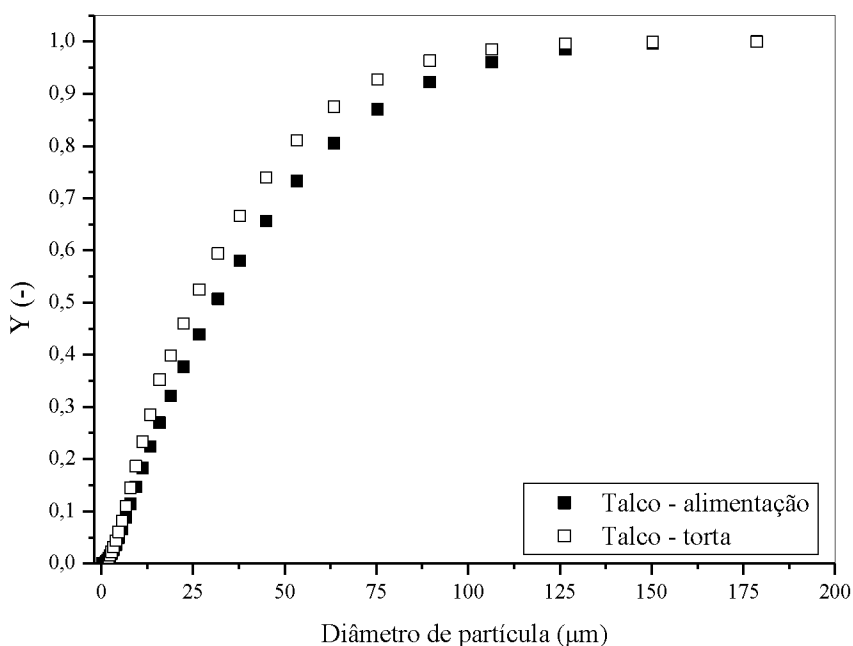


Figura 4.3: Distribuição granulométrica média do talco puro nas tortas de filtração.

A Tabela 4.2 representa os diâmetros encontrados para as partículas do talco puro, diâmetro médio de *Sauter* e diâmetro médio volumétrico como também o fator de forma dinâmico (k) obtido pelo uso da Equação 2.32.

Tabela 4.2: Caracterização do talco puro.

Caracterização	D (3,2) (μm)	(D4,3) (μm)	Densidade (kg/m^3)
Alimentação	16,177	39,068	
0 Hz	11,324	26,001	
12 Hz	15,323	36,572	
17 Hz	14,561	32,181	$2876,8 \pm 2,2$
12 Hz	14,208	33,916	
intermitente			
17 Hz	14,598	32,306	
intermitente			

4.1.3 - Polvilho doce

O material particulado polvilho doce utilizado nesse trabalho foi da marca Yoki Alimentos Ltda, lote A2L-A6A9. A Figura 4.4 mostra a distribuição granulométrica do polvilho doce.

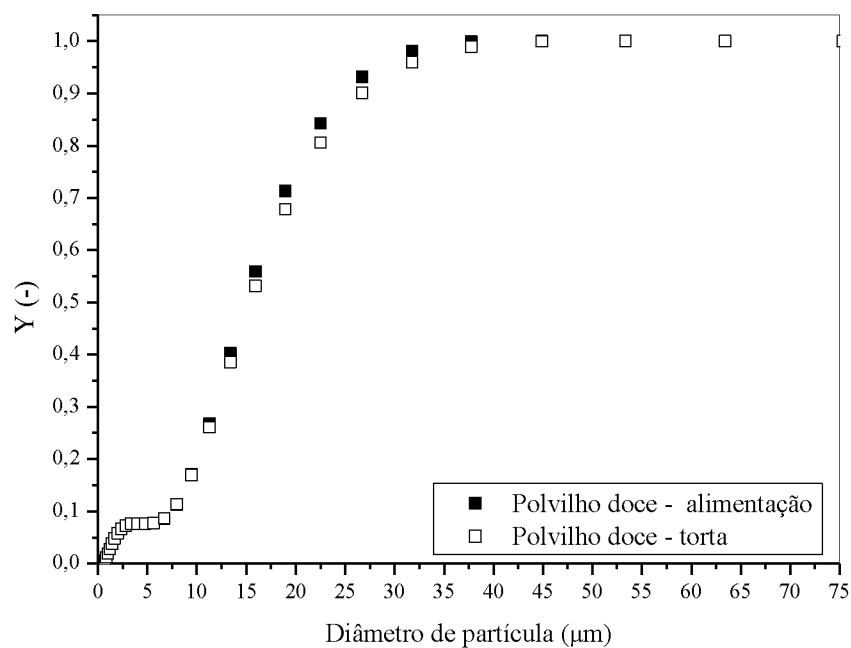


Figura 4.4: Distribuição granulométrica média do polvilho doce nas tortas de filtração.

Diversos trabalhos na literatura utilizaram o polvilho doce como material particulado na operação de filtração e gases como Ito (2002), Felicetti (2004), Rodrigues (2006), Azevedo (2009), Barros (2010), Arouca (2014) entre outros.

O polvilho doce apresenta um formato mais próximo da esfera e arredondada com valor de circularidade de 0,98.

A Tabela 4.3 representa os diâmetros encontrados para as partículas do polvilho doce, diâmetro médio de *Sauter* e diâmetro médio volumétrico como também o fator de forma dinâmico (k) obtido pelo uso da Equação (2.32).

Tabela 4.3: Caracterização do polvilho doce.

Caracterização	D (3,2) (μm)	(D4,3) (μm)	Densidade ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
Alimentação	8,164	16,164	
0 Hz	8,185	15,846	
12 Hz	8,039	15,343	
17 Hz	7,718	14,972	1532 \pm 0,9
12 Hz	7,838	14,497	
intermitente			
17 Hz	8,526	16,600	
intermitente			

Foi possível observar mediante os resultados obtidos que os materiais particulados apresentaram grande disparidade tanto na distribuição granulométrica quanta na densidade das partículas, o que possibilitou avaliar a formação e remoção das tortas no sistema de filtração com efeitos de vibração mecânica longitudinal em comparação ao sistema estático.

4.2 – Variáveis na filtração de gases com rocha moída

Com o intuito de estabelecer as condições operacionais de filtração de gases e, principalmente, o funcionamento do sistema de filtração adaptado com o acoplamento de um motor excêntrico que possibilitava uma vibração mecânica longitudinal ao fluxo gasoso para diferentes faixas de frequências, realizou-se uma série de testes preliminares, com réplicas,

para o material particulado rocha fosfática moída, visando averiguar o comportamento das faixas de frequências na formação e remoção das tortas de filtração.

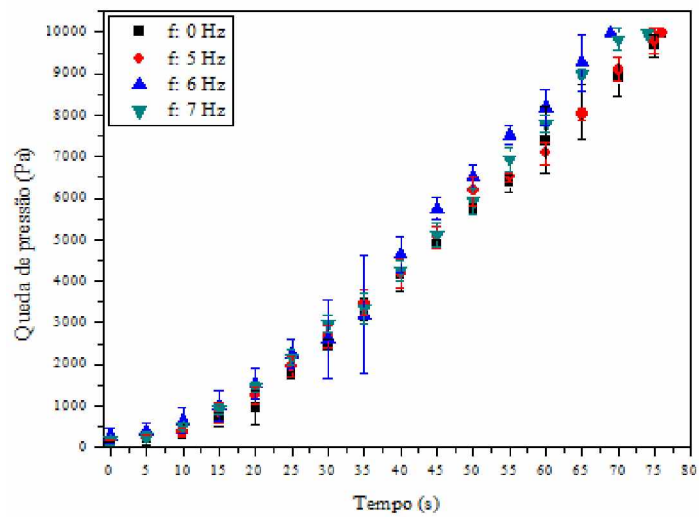
Os ensaios de filtração foram realizados com uma velocidade de filtração de 0,10 m/s, para uma queda de pressão máxima de 10000 Pa, com vazão mássica de 0,183 g/s para os três materiais particulados utilizados.

Avaliaram-se os efeitos das frequências de 0, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 17, 18 e 19 Hz classificadas em faixa de frequência baixa (5, 6 e 7 Hz), faixa de frequência intermediária (12, 13 e 14 Hz) e faixa de frequência alta (17, 18 e 19 Hz) nas respostas dos parâmetros da torta de filtração em relação ao tempo de filtração (s), massa de pó acumulada por unidade de área (kg/m^2), para a rocha fosfática moída.

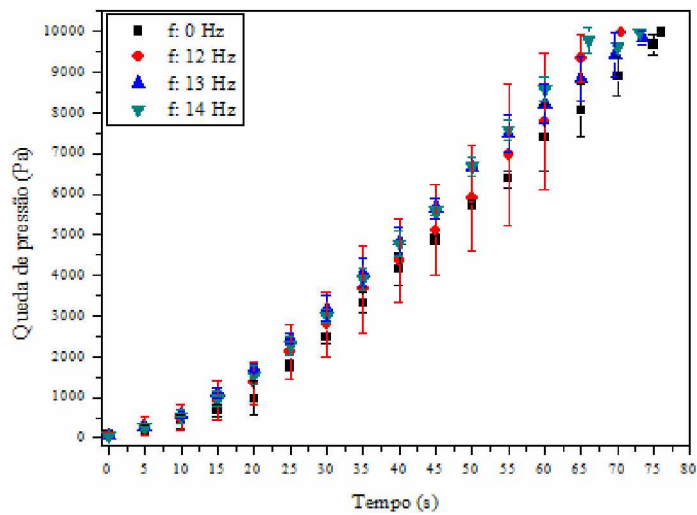
Após a análise de um teste de hipótese para verificar se houve diferenças estatísticas na massa da torta coleta para cada frequência em relação ao sistema estático, foram avaliadas características específicas da torta tais como a porosidade (ϵ), a resistência específica da torta (k_2), a espessura da torta de filtração (L) e a força de arraste no meio filtrante (S).

Para os materiais particulados talco puro e polvilho doce foram realizados testes experimentais nas mesmas condições de queda de pressão máxima a ser atingida no meio filtrante, velocidade de filtração para a formação da torta e velocidades de limpeza para a remoção da torta, com as frequências que apresentaram diferenças estatísticas significativas com a rocha fosfática moída. Foram realizados testes de hipóteses nessas frequências adotadas para o talco puro e polvilho doce e, posteriormente, analisadas as características específicas das tortas na sua formação e remoção.

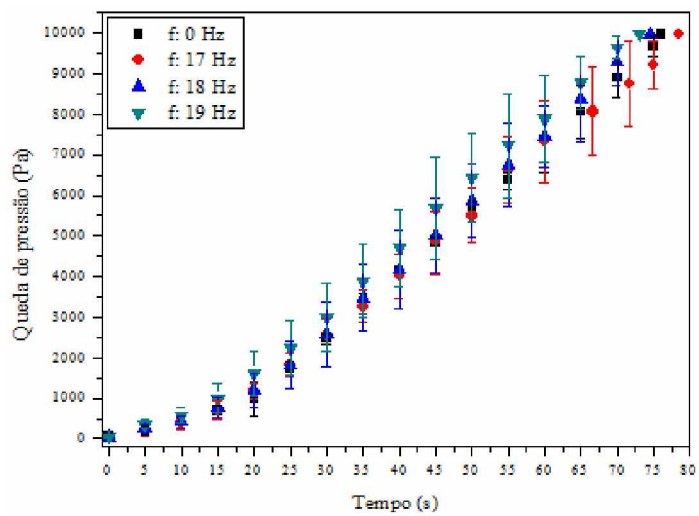
Na Figura 4.5 são mostrados os tempos de filtração em função da queda de pressão até o limite de 10000 Pa com o objetivo de verificar se havia alguma relação entre o tempo de filtração e as frequências de vibração, ou seja, analisar se as frequências maiores proporcionavam maior tempo ou se as baixas frequências um menor tempo de filtração em relação ao sistema estático.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.5: Queda de pressão em função do tempo de filtração para as (a) faixas baixa, (b) intermediária e (c) alta em comparação ao sistema estático.

Inicialmente, foi possível observar que as frequências de vibração para todas as faixas, baixa, média e alta proporcionaram menores tempos de filtração do que sistema estático (f : 0 Hz), com exceção da frequência de f : 17 Hz que apresentou pouco maior que o sistema estático. Porém, não foi possível identificar um padrão de comportamento entre as variáveis frequências de vibração e tempo de filtração. Isso quer dizer que, as frequências de maiores valores não proporcionaram maiores tempos de filtração e nem as baixas frequências menores tempos de filtração em relação ao sistema estático, ambas apresentaram valores próximos ao sistema isento de vibração, sendo um ganho em tempo de 3,28% para a frequência de 17 Hz e uma redução máxima encontrada de 7,89% para as frequências de 6 e 12 Hz.

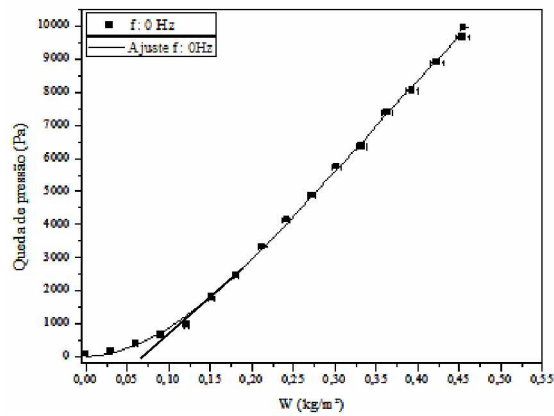
Arouca (2014) nos estudos de filtração realizados com vibração mecânica perpendicular ao fluxo gasoso também verificou que não houve um padrão de comportamento entre a frequência de vibração e a variável tempo de filtração.

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 representam as curvas da queda de pressão médias em função das massas médias de pó acumulada por unidade de área para o sistema estático e o sistema submetido às vibrações mecânicas classificadas nas faixas de baixa (f : 5, 6 e 7 Hz), média (12, 13 e 14 Hz) e alta (f : 17, 18 e 19 Hz), respectivamente. Os ajustes das curvas de filtração estão expostos no Apêndice A.

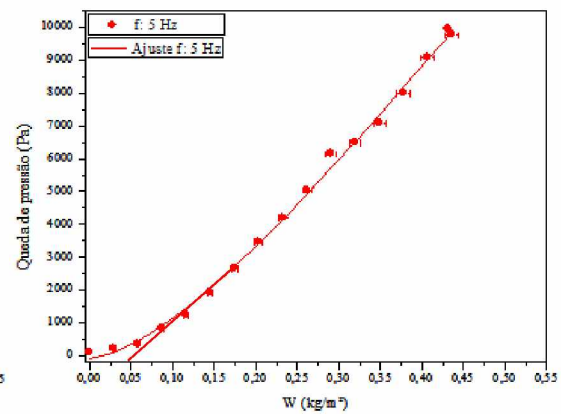
As linhas contínuas representam os pontos de colmatação que correspondem ao acúmulo de pó necessário para o início da formação da torta e consistem no lugar geométrico obtido para o cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas em que é obtida a massa de pó necessária para a formação da torta, segundo Wash (1996).

Observa-se que as curvas de filtração apresentaram um comportamento típico da operação de filtração de gases com a concavidade da curva voltada para cima, o que indica a etapa de filtração de profundidade. Posteriormente, percebeu-se uma linearidade da curva caracterizada como etapa de filtração de transição em que há a formação dos dendritos que consistem em estruturas aglomeradas de partículas no interior do tecido que atuam como os novos elementos coletores (RODRIGUES, 2006).

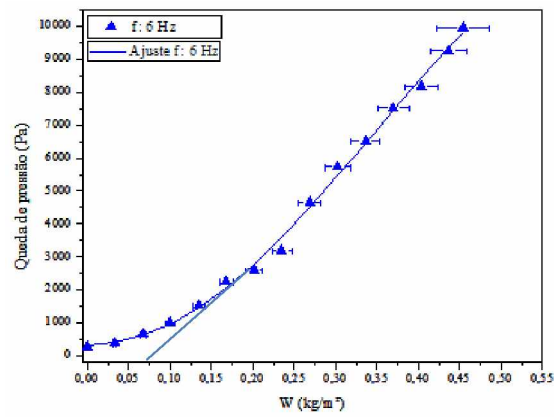
A formação desses aglomerados proporciona um aumento da taxa de queda de pressão e diminuição da penetração das partículas no tecido. Com a formação dos dendritos têm-se uma camada superficial de material particulado, denominada de torta de filtração. Após a torta formada tem-se a última etapa da filtração conhecida como filtração superficial, em que a própria torta é o novo elemento de coleta de partículas (TANABE, 2008).



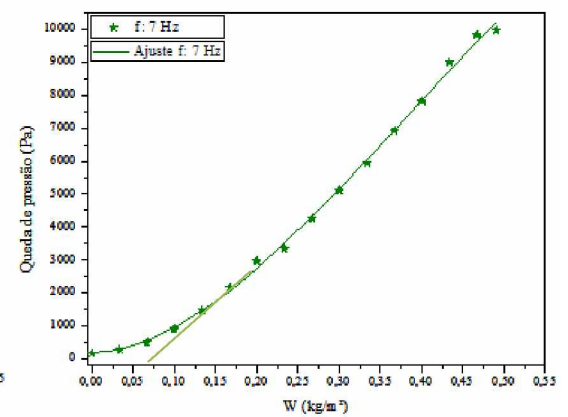
(a)



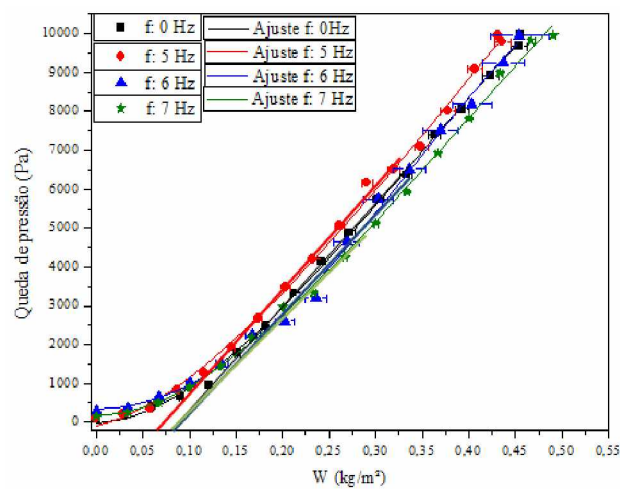
(b)



(c)

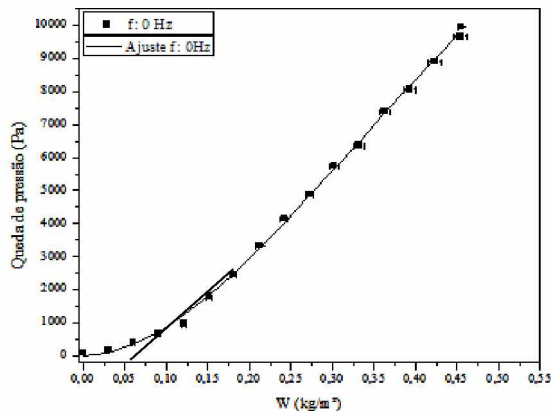


(d)

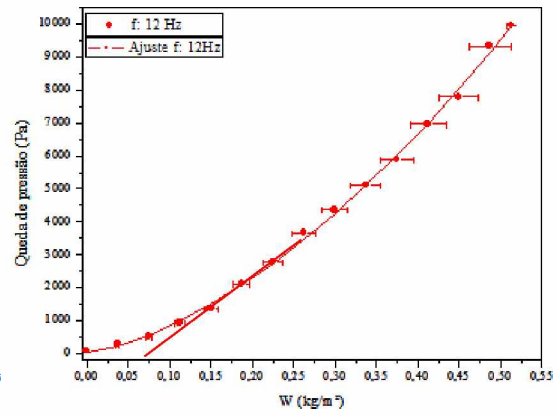


(e)

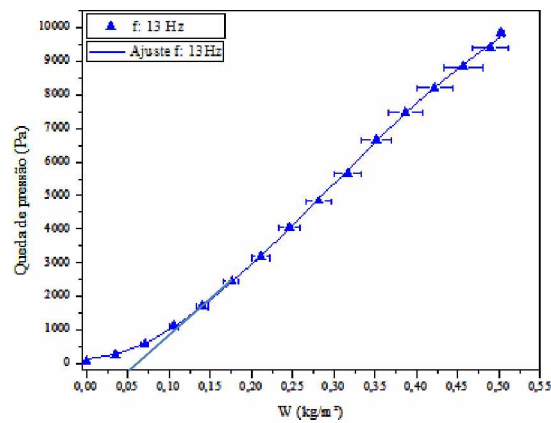
Figura 4.6: Queda de pressão em função das massa de pó acumulada por unidade de área para a (a) $f: 0$ Hz, (b) $f: 5$ Hz, (c) 6 Hz, (d) 7 Hz e (e) comparação com o sistema estático.



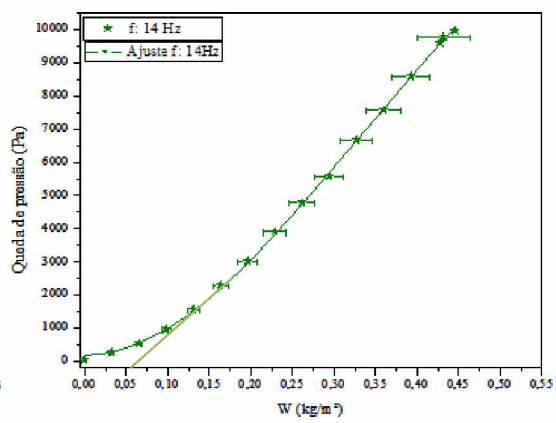
(a)



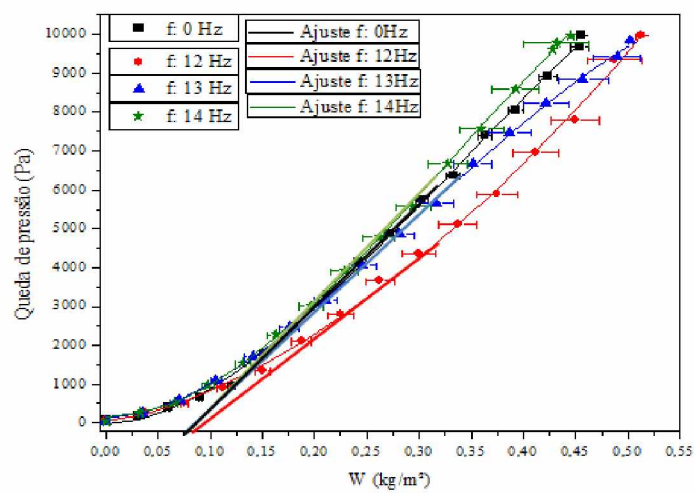
(b)



(c)

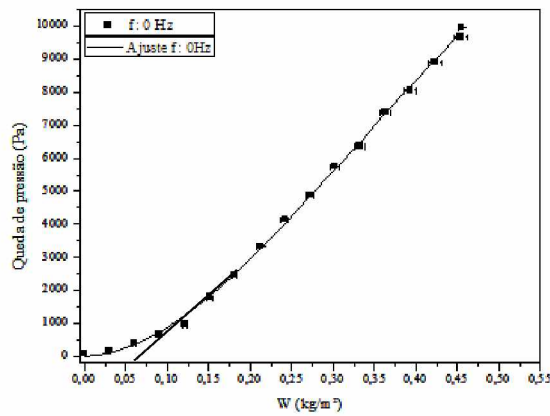


(d)

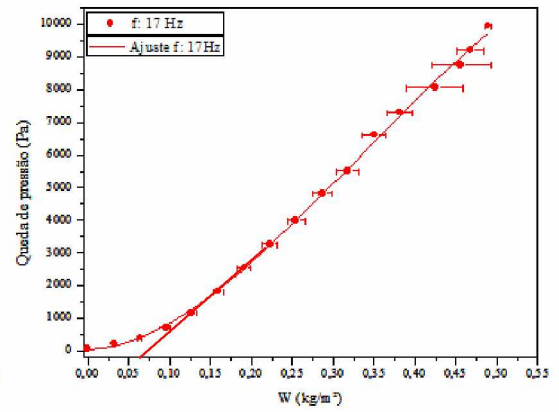


(e)

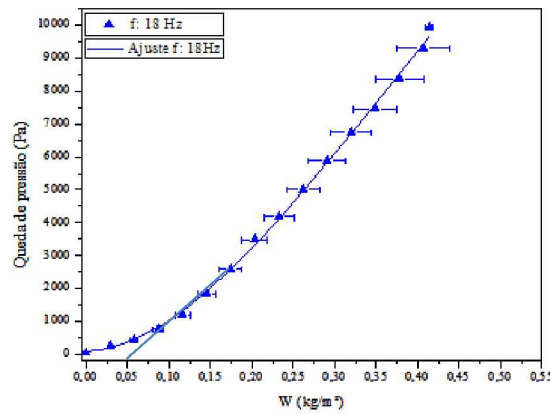
Figura 4.7: Queda de pressão em função das massas de pó acumuladas por unidade de área para a (a) $f: 0 \text{ Hz}$, (b) $f: 12 \text{ Hz}$, (c) $f: 13 \text{ Hz}$, (d) $f: 14 \text{ Hz}$ e (e) comparação com o sistema estático.



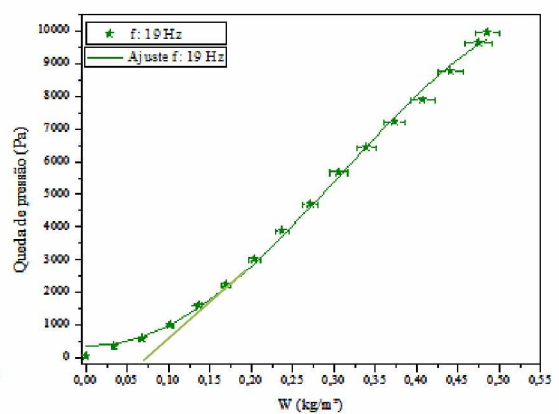
(a)



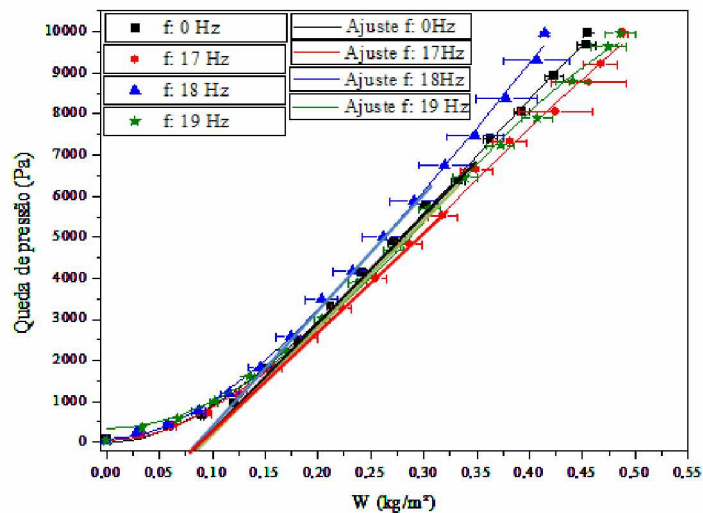
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.8: Queda de pressão em função das massas de pó acumuladas por unidade de área para a (a) $f: 0$ Hz, (b) $f: 17$ Hz, (c) $f: 18$ Hz, (d) $f: 19$ Hz e (e) em comparação ao sistema estático.

Na Figura 4.6 é possível observar as curvas de filtração em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as faixas de frequências baixa, intermediária e alta em comparação com o sistema estático.

Nota-se que, para as frequências de 6 e 7 Hz, as curvas de filtração apresentaram a mesma quantidade de massa acumulada por unidade de área necessária para o início da formação da torta, sendo de 0,080 kg/m² e para a frequência de 5 Hz, um acúmulo de, aproximadamente, 0,070 kg/m². Isso quer dizer que a frequência de 5 Hz proporcionou ao sistema uma maior perda de carga para que a torta começasse a se formar devido a acomodação das partículas no interior do tecido, fazendo com que acelerasse sua saturação em relação ao sistema estático.

Na Figura 4.7 as frequências de vibração da faixa média de 13 e 14 Hz e na Figura 4.8, da faixa de frequências altas apresentaram comportamento semelhante ao sistema estático com a mesma quantidade de acúmulo de pó necessária para o início da formação da torta. Já para a frequência de 12 Hz mostrou ponto de colmatação superior ao sistema estático.

A diferença dos pontos de colmatação foi baixa, pois as frequências de 0, 6, 7, 12, 17, 18 e 19 Hz tiveram pontos de colmatação de 6,33% maiores que as frequências de 5, 13, 14 Hz.

Segundo Arouca (2014), o motivo para que essas frequências apresentassem comportamentos semelhantes entre si está relacionado ao comportamento do motor vibrador, que justificou esse fato devido o movimento periódico do motor de vibração ser composto por séries de movimentos harmônicos simples, sendo cada um desses movimentos descritos por uma função senoidal. Isso quer dizer que, uma frequência mais baixa levava a resultados a um ajuste semelhante ao ajuste dos resultados obtidos a partir de uma frequência mais alta.

Foi possível observar ainda na Figura 4.8 a quantidade de massa acumulada por unidade de área até o final dos ensaios de filtração, para a queda máxima de 10000 Pa. Nota-se que as frequências de vibração de 5, 6 e 18 Hz apresentaram menor quantidade de carga mássica acumulada em relação ao sistema estático, sendo que as demais frequências formaram tortas com maior quantidade de pó acumulada.

Dessa forma, com o intuito de verificar se as faixas de frequências de vibração utilizadas apresentavam diferenças estatísticas significativas em relação as massas de tortas e também para poupar a unidade experimental de possíveis danos em sua estrutura durante os ensaios foi realizado um Teste de Hipóteses, visto que as frequências apresentaram pontos de colmatação semelhantes e pequena diferença de massas acumuladas por área para queda de pressão máxima. Fez-se análise estatística por ANOVA para todos os experimentos e não foi observado alteração nos resultados quando comparados com os resultados do Teste de Hipótese.

O Teste de Hipóteses foi realizado em relação a massa de torta de filtração encontrada tanto para a frequência de 0 Hz (sistema estático) quanto para as faixas de frequências baixa (5, 6 e 7 Hz), média (12, 13 e 14 Hz) e alta (17, 18 e 19 Hz).

A hipótese nula é dada como verdadeira até que provas estatísticas indiquem o contrário e é comumente designada por H_0 e decorre da suposição que a diferença entre as amostras é nula. Assim, a hipótese nula foi baseada na igualdade entre as massas das tortas de filtração. A hipótese alternativa é denotada por H_1 e consiste na afirmação que deve ser verdadeira se a hipótese nula for falsa.

Nesse caso, a hipótese alternativa foi verificar que houve a diferença entre as massas das tortas de filtração. O intervalo de confiança foi de 95%, ou seja, $\alpha=0,05$ e a probabilidade do erro dada por p .

Hipóteses:

- H_0 : igualdade das massas das tortas de filtração
- H_1 : diferença entre as massas das tortas de filtração

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Nas Tabelas 4.4 a 4.6 podem-se ser encontrados os valores para p em relação ao sistema estático para as três faixas de frequências.

Tabela 4.4: Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para as faixas de frequências baixas.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	5	6	7
0	-	0,0526	0,1433	0,0817

Observa-se que para toda a faixa de frequência baixa em comparação ao sistema estático, os valores de p foram maiores que 0,05. Isso quer dizer que a hipótese de nulidade foi

verdadeira e que não houve diferenças estatísticas significativas entre as massas das tortas de filtração para o sistema estático para com o sistema com vibração para a faixa baixa. As massas das tortas do sistema com vibração por apresentarem massas iguais ao sistema estático induziu a não se realizar mais ensaios de filtração nessa faixa. Os valores encontrados para p para a faixa de frequência intermediária encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para as faixas de frequências intermediárias.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	12	13	14
0	-	0,0001	0,0001	0,1467
12	0,0001	-	0,0680	-
13	0,0001	0,0680	-	-

Na Tabela 4.5 é possível observar que as frequências de vibração de 12 e 13 Hz apresentaram diferenças entre as massas das tortas de filtração quando comparadas com o sistema estático e iguais quando comparadas entre si. A frequência de 14 Hz manteve a igualdade das massas com o sistema estático.

Os valores encontrados para p para a faixa de frequência intermediária encontram-se na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para as faixas de frequências médias.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	17	18	19
0	-	0,0003	0,0285	0,0134
17	0,0003	-	0,0005	0,6198
18	0,0285	0,0005	-	0,0051

Na Tabela 4.6 verificou-se que todas as frequências da faixa alta apresentaram diferenças entre as massas das tortas quando comparadas ao sistema estático. As frequências de 17 e 19 Hz mantiveram a igualdade das massas, porém com massas das tortas diferentes com a frequência de 18 Hz.

A partir do Teste de Hipóteses realizou-se as análises dos parâmetros das tortas de filtração para as frequências que apresentaram diferenças estatísticas das massas das tortas em comparação com o sistema isento de vibração.

A Figura 4.9 representa as curvas de arraste do filtro em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências 0, 12, 17 e 18 Hz geradas nas condições experimentais adotadas.

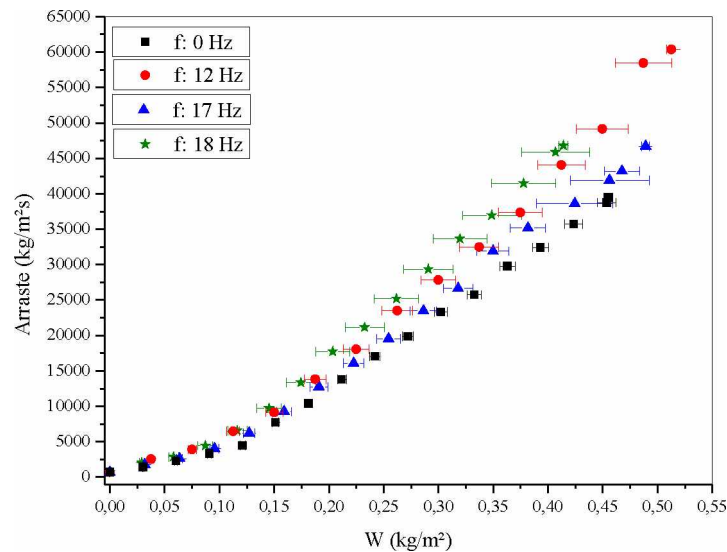


Figura 4.9: Arraste em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências 12, 17 e 18 Hz em comparação com o sistema estático; rocha moída (0 Hz).

Um teste de hipótese foi realizado para verificar se havia representatividade estatística entre os arrastes do meio filtrante do sistema com vibração e o estático, na qual avaliou-se como:

- H_0 : igualdade dos arrastes do meio filtrante;
- H_1 : diferenças entre os arrastes do meio filtrante.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Na Tabela 4.7 é possível notar que o teste hipótese apresentou para todas as frequências de vibração diferenças significativas em relação ao sistema estático e que a hipótese alternativa

é verdadeira. Observa-se que as curvas de arraste formadas para o sistema com vibração apresentaram praticamente o mesmo comportamento que o sistema estático até atingirem, aproximadamente, um acúmulo de $0,08 \text{ kg/m}^2$, ou seja, uma mesma resistência do filtro e que após esse valor é possível observar que o sistema submetido às vibrações apresentou uma maior inclinação da reta, caracterizando em uma maior resistência do meio filtrante.

Tabela 4.7: Teste de hipótese para o arraste do meio filtrante para os sistemas estático e com vibração.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	12	17	18
0	-	0,0001	0,0007	0,0001

Isso sugeriu dizer que, o sistema com vibração proporcionou uma maior acomodação das partículas no tecido e entre elas, reduzindo a permeabilidade do meio filtrante, devido a formação de tortas mais densamente empacotadas o que aumenta o arraste em relação ao sistema estático.

A Figura 4.10 representa a espessura das tortas de filtração determinadas pela Equação (2.24) com o aumento da massa de pó acumulada por unidade de área para os sistemas estático e com vibração.

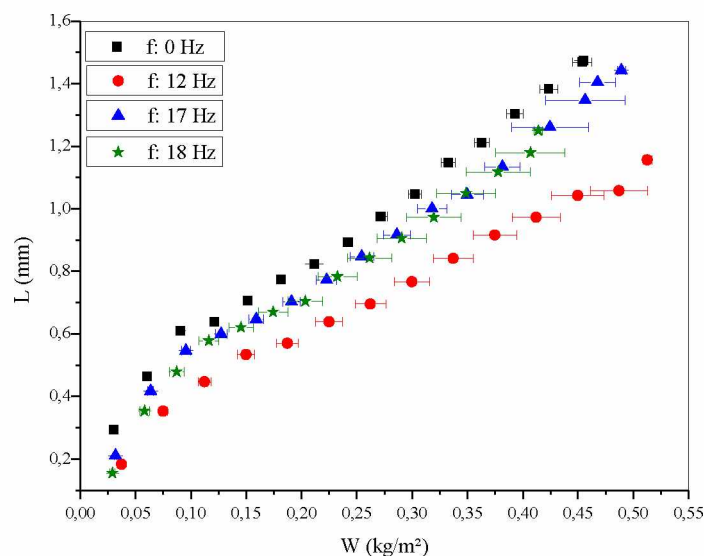


Figura 4.10: Espessura da torta para os sistemas com e sem vibração mecânica.

Na Tabela 4.8 mostra o resultado do teste de hipótese sob as condições de hipóteses de nulidade e de alternativa.

Teste de Hipótese

- H_0 : igualdade das espessuras da torta;
- H_1 : diferenças entre espessuras da torta.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Tabela 4.8: Teste de hipótese para as espessuras das tortas para os sistemas estático e com vibração.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	12	17	18
0	-	0,0000	0,4389	0,0002

Nota-se que as vibrações de 12 e 18 Hz em relação ao sistema estático, foram as que adotaram p menor que 0,05, indicando que a hipótese alternativa é verdadeira.

Observa-se na Figura 4.10 que as frequências de vibração conduziram a formação de tortas menos espessas que o sistema estático. Isso significa que, provavelmente, proporcionaram um rearranjo na acomodação das partículas sobre o tecido e possibilitaram a formação de tortas mais compactadas, ou seja, com um menor comprimento de torta. As frequências de vibração de 12 e 18 Hz apresentaram para a carga mássica máxima, espessuras 22 e 15% menores que o sistema estático, respectivamente.

Um Teste de Hipótese foi realizado em relação às resistências específicas das tortas para verificar se o sistema com vibração apresentava diferenças significativas em relação ao sistema estático. Os resultados foram apresentados na Tabela 4.19 sob as condições de hipótese alternativa e de nulidade.

- H_0 : igualdade das resistências específicas das tortas;
- H_1 : diferenças entre as resistências específicas das tortas.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Tabela 4.9: Teste de hipótese para a resistência específica da torta para os sistemas estático e com vibração mecânica.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	12	17	18
0	-	0,0001	0,0056	0,0000

Percebe-se na Tabela 4.9 que a hipótese alternativa é verdadeira e que há diferenças estatísticas significativas entre as resistências específicas das tortas do sistema estático com o sistema com influência da vibração mecânica. Isso sugere que o sistema com influência das vibrações de 12, 17 e 18 Hz influenciaram na acomodação das partículas no meio filtrante e entre elas, conforme pode ser visto na Figura 4.11, em que formaram tortas mais resistentes que o sistema estático, provavelmente, pelo empacotamento mais denso das partículas nas camadas das tortas de filtração.

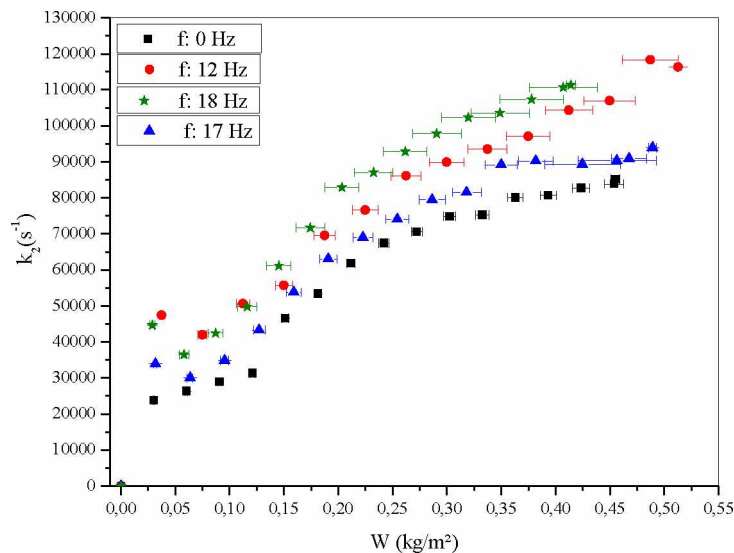


Figura 4.11: Resistência específica da torta para o sistema com e sem vibração mecânica.

Isso pode estar relacionado ao maior empacotamento das camadas das tortas uma sobre as outras e no tecido, ou seja, a medida que aumenta a carga mássica ou perda de carga, as frequências de vibração intensificaram a compressão das camadas mais inferiores causadas

pelas maiores forças de arraste, conforme visto na Figura 4.9, através das camadas superiores, formando tortas menos espessas devido ao encolhimento das camadas de tortas.

Assim, as primeiras camadas finas de tortas são encolhidas pelas camadas mais novas pelas forças de compressão advindas das somas das camadas sucessoras, como pôde ser visto na Figura 4.10, resultando em tortas com maior resistência específica, pois houve a redução dos espaços vazios do tecido e entre as partículas, diminuindo a sua permeabilidade (CHEN et al, 2004).

Um Teste de Hipótese foi realizado em relação às porosidades das tortas com as condições de hipóteses de nulidade e alternativa conforme descritas abaixo:

- H_0 : igualdade das porosidades das tortas;
- H_1 : diferenças entre as porosidades das tortas.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Na Tabela 4.10 observa-se que a hipótese alternativa é verdadeira, na qual há diferenças estatísticas significativas das porosidades das tortas do sistema com vibração em comparação ao sistema estático.

Tabela 4.10: Teste de hipótese para a porosidade da torta para os sistemas estático e com vibração mecânica.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>			
	0	12	17	18
0	-	0,0000	0,0056	0,0000

Dessa forma, pela Figura 4.12 nota-se que a porosidade das tortas de filtração decresceu à medida que aumentou a carga mássica tanto para o sistema estático quanto para o sistema com vibração para uma mesma carga mássica, velocidade de filtração constante e queda de pressão máxima.

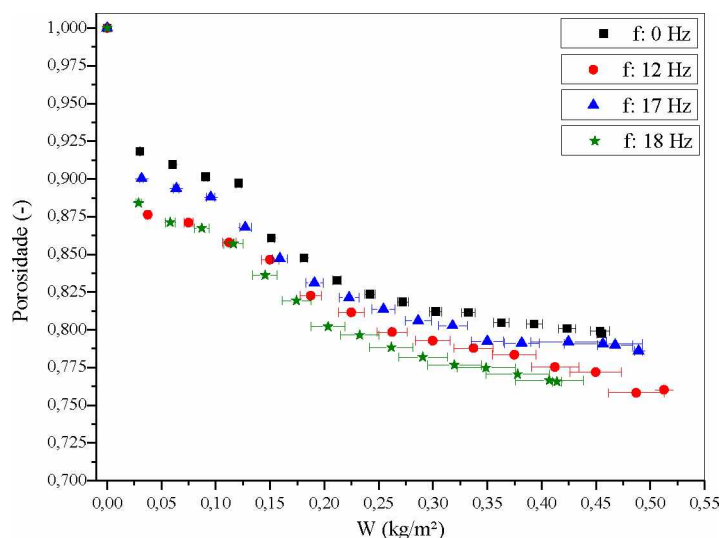


Figura 4.12: Porosidade da torta para o sistema com e sem vibração mecânica.

Foi possível observar que as frequências de vibração também conduziram a formação de tortas menos porosas que o sistema estático, confirmando a justificativa dada que foi devido as frequências proporcionarem uma maior intensificação no empacotamento das partículas sob o efeito da maior compressibilidade das tortas que possibilitou a formação de tortas menos porosas que o sistema estático

Dessa forma, pôde-se concluir que as frequências de vibração de 12, 17 e 18 Hz, na formação de tortas de rocha fosfática moída influenciou significativamente na estrutura das tortas, resultando em tortas menos espessas, mais resistentes e região mais porosa menor que o sistema isento de vibração, o que foi de se esperar quando se tratava de tortas compressíveis em que uma torta menos espessa teria uma região mais porosa menor e menos resistente (FARGNOLI, 2010).

O sistema com vibração longitudinal concomitante à operação de filtração não foi eficiente e nem eficaz quando comparado ao sistema estático, ou seja, não viável para execução.

4.2.1 - Forças de adesão

Nesta etapa verificou-se a influência das frequências de vibração na operação de remoção das tortas de filtração através do mecanismo de limpeza por fluxo de ar reverso.

Os testes experimentais foram realizados com velocidades de filtração de 0,10m/s para uma queda máxima de pressão nas tortas de filtração de 10000 Pa, a uma vazão de 0,183 g/s e velocidades de limpeza 7,7, 11 e 15, 5 cm/s, na qual limpava-se o filtro da menor velocidade para a maior.

As forças de adesão para cada frequência foram determinadas pela metodologia de *Seville et al. (1989)* conforme exposto no Capítulo 2. Os procedimentos para a determinação das forças de adesão da rocha fosfática moída nos sistemas estático e com vibração são representados pelas Figuras 4.13 a 4.15.

A Figura 4.13 mostra as velocidades de limpeza adotadas em função da fração de massa retida na torta para os sistemas estático e com efeito de vibração.

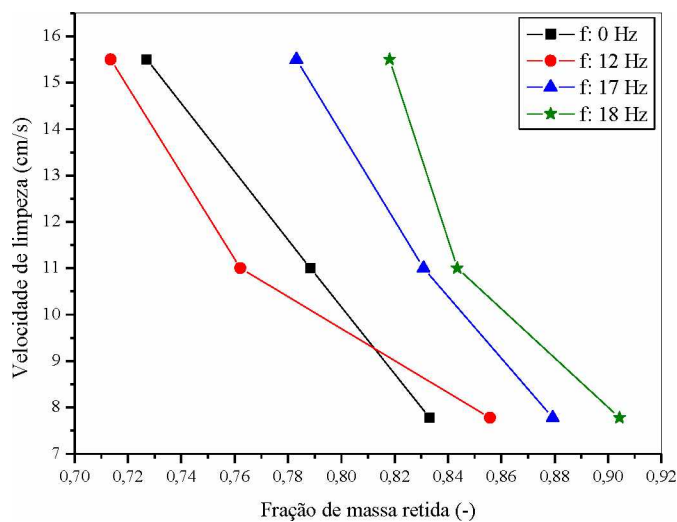


Figura 4.13: Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida para os sistemas com vibração e estático; rocha moída.

Foi possível observar que entre a primeira e segunda velocidades de limpeza, as frequências de 12, 17 e 18 Hz apresentaram maiores desprendimentos da torta que o sistema estático. Já entre a segunda e terceira velocidades, o sistema estático apresentou maior

desprendimento da torta que os sistemas submetidos com vibrações, sendo a frequência de 18 Hz a que apresentou maior quantidade de pó retido no meio filtrante.

Após à operação de limpeza, constatou-se que o sistema com vibração de 12 Hz foi o que apresentou uma maior eficiência de regeneração do meio filtrante, com uma diminuição de 17% da quantidade de massa retida no tecido, sendo que as frequências de 0, 17 e 18 Hz apresentaram uma diminuição da massa retida de 13%, 11% e 9%.

Pode-se concluir que as altas frequências conduziram a um maior empacotamento das partículas de rocha moída o que pode ter interferido na eficiência de regeneração do meio filtrante e para a frequência de 12 Hz justifica-se pelo fato de ter causado maior desprendimento de pó entre a primeira e segunda velocidades.

A Figura 4.14 representa a queda de pressão na limpeza em função da fração de massa retida para o sistema estático e o sistema submetido com vibração.

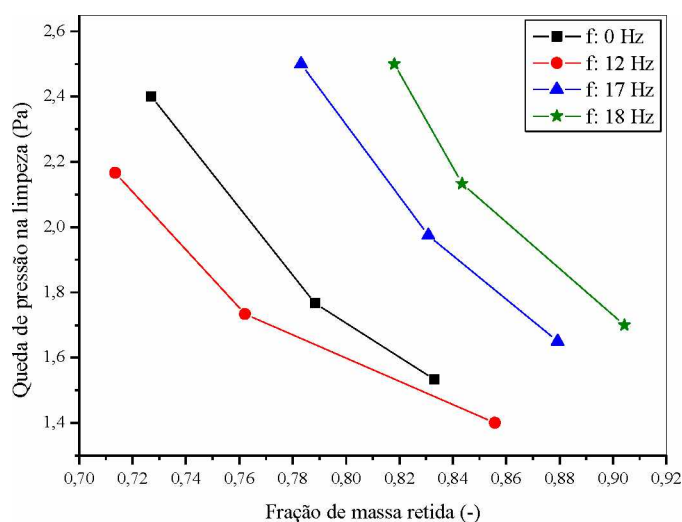


Figura 4.14: Queda de pressão na limpeza em função da fração de massa retida para os sistemas com vibração e estático; rocha moída.

Na Figura 4.14 é possível observar que o sistema submetido as frequências de vibração de 17 e 18 Hz apresentaram maior queda de pressão entre a primeira e segunda e entre a segunda e terceira limpezas em relação ao sistema estático e o sistema com efeito da frequência de vibração de 12 Hz. Isso ocorreu devido as frequências de vibração de 17 e 18 Hz apresentarem as maiores frações de massa retida

Observou-se ainda que, a frequência de 12 Hz foi a que apresentou menor queda de pressão no meio filtrante durante as limpezas em consequência da maior fração de massa removida.

Na Figura 4.15 foi possível observar a velocidade de limpeza em função da queda de pressão na limpeza. Através do tratamento estatístico, denominado de regressão linear, para a obtenção da equação da reta representativa dos pontos obtidos por interpolação a partir dos gráficos das Figuras 4.13 e 4.14 de acordo com a metodologia proposta por *Seville et al.*, (1989). O coeficiente angular representa a resistência específica do meio filtrante (k_1) e o coeficiente linear corresponde a tensão de remoção da torta (σ). Determinou-se os índices de correlação (R^2) dos dados plotados com as equações de reta obtidas, que representam o grau de aderência dos dados com a equação. A determinação da força de adesão foi obtida pela Equação (2.42).

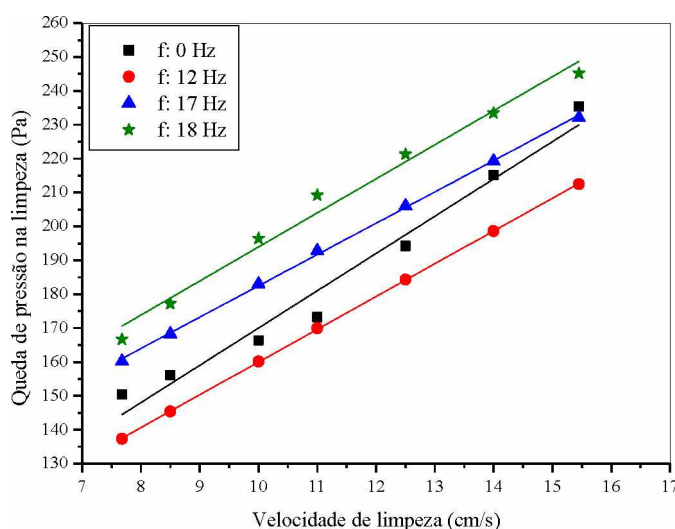


Figura 4.15: Queda de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza para os sistemas com vibração e estático; rocha moída.

Na Tabela 4.11 apresentou-se os valores de da resistência específica do filtro, da tensão de remoção e da força de adesão e os índices de correlação para os sistemas estático e com efeito de vibração. Diante a Tabela 4.11 é possível verificar que o sistema de vibração foi o que apresentou maior força de adesão das partículas e maior resistência específica no meio filtrante, com 50,1% e 55,7% maiores que o sistema estático para as frequências de 17 e 18 Hz, confirmando o que havia explanado anteriormente que, as frequências de vibração

proporcionaram maior empacotamento das partículas, tornando-se inviável sua execução concomitante à operação de filtração e à remoção da torta.

Tabela 4.11: Valores da resistência específica do filtro, tensão de remoção e força de adesão para o sistema estático e com efeito de vibração.

V_f(m/s)	f	W	R²	k₁	σ_R	F_c(N)
	(Hz)	(kg/m²)		(N.s/m³)	(N/m²)	
0,10	0	0,455	0,974	59,986	1100,3	0,92
	12	0,513	0,999	63,243	967,3	0,97
	17	0,489	0,999	90,044	924,2	1,38
	18	0,414	0,986	93,419	1005,3	1,43

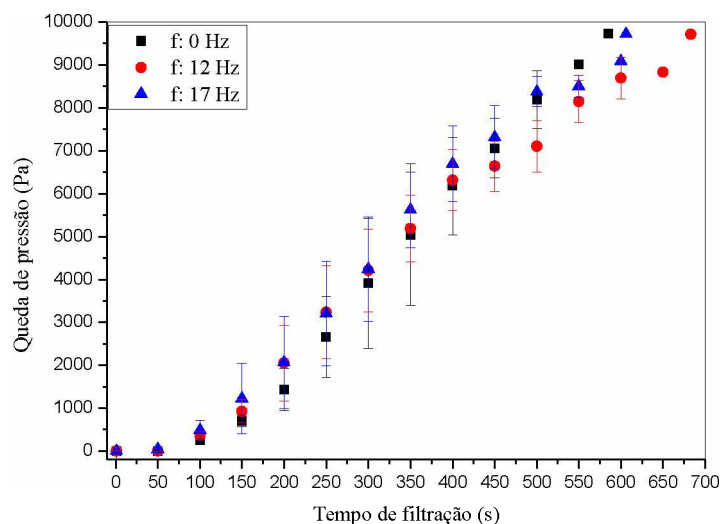
A frequência de vibração de 18 Hz para todos os ensaios foi a que se apresentou com menor comprimento de torta (espessura), consequentemente, mais resistente e menos porosa, impactando, de forma negativa, o objetivo deste trabalho que era o de obter o desprendimento da torta de filtração concomitante à operação de filtração. Por esse motivo e também devido ser uma frequência da faixa alta do mesmo grupo que a frequência de 17 Hz, resolveu-se, apenas com as frequências de 12 e 17 Hz, realizar ensaios de filtração para diferentes materiais particulados em relação a distribuição granulométrica e morfologia que permitissem alcançar melhor desempenho da vibração mecânica longitudinal ao fluxo.

Para os materiais particulados talco puro e polvilho doce foram realizados testes experimentais nas mesmas condições de queda de pressão máxima a ser atingida no meio filtrante, velocidade de filtração para a formação da torta e velocidades de limpeza para a remoção sua remoção, com as frequências que apresentaram diferenças estatísticas significativas apresentadas com a rocha fosfática moída.

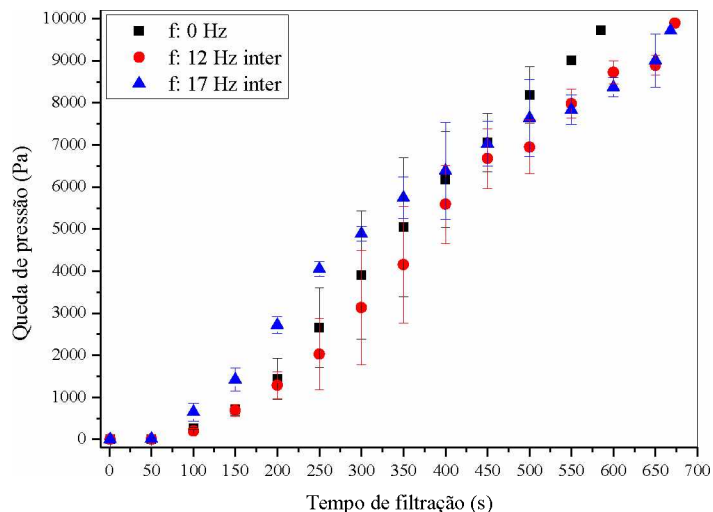
4.3 – Ensaios de filtração de gases com polvilho doce

Os ensaios de filtração com suspensões de polvilho doce foram realizados com uma velocidade de filtração de 0,10 m/s, para uma queda de pressão máxima de 10000 Pa, com vazão mássica de 0,183 g/s para o polvilho doce. Foram avaliados os efeitos das frequências de

0, 12 e 17 Hz sistema independente e 12 e 17 Hz sistemas intermitentes quanto aos parâmetros da torta de filtração. A Figura 4.16 representa o tempo necessário para a formação das tortas de filtração.



(a)



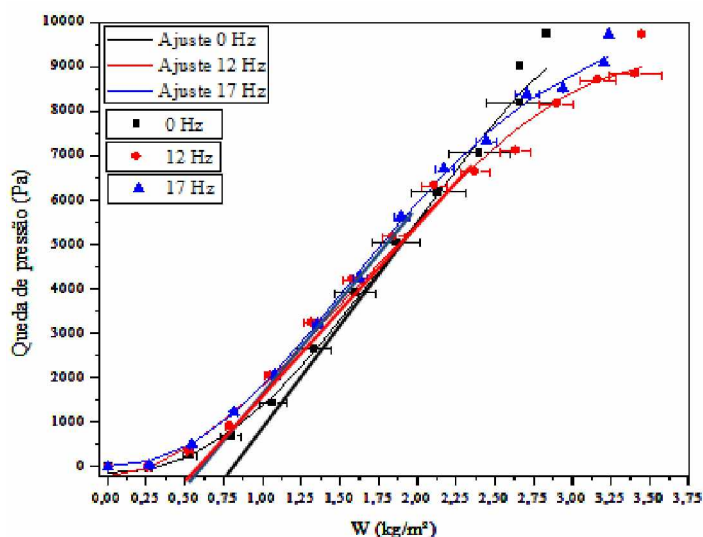
(b)

Figura 4.16: Tempo de filtração para os sistemas (a) independentes e (b) intermitentes em comparação ao sistema estático, respectivamente; polvilho doce.

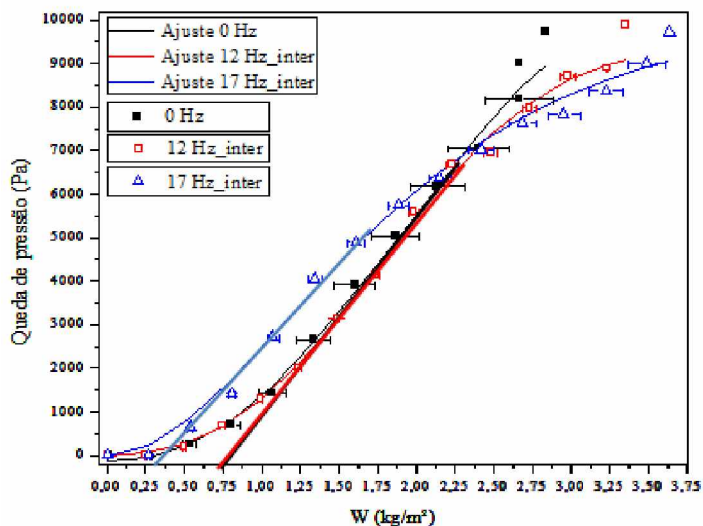
Observou-se na Figura 4.16 que, para uma mesma queda de pressão, os ensaios de filtração para os sistemas sob influência das frequências de vibração (f: 12 Hz - t: 683s), (f: 17 Hz - t: 606s) e sistema híbrido (f: 12 Hz - t: 673s) e (f: 17 Hz - t: 668s) apresentaram tempos de

filtração superiores ao sistema estático (f: 0 Hz, t - 585s), sendo 16,75%, 3,59%, 15,04% e 14,19% maiores, respectivamente.

Na Figura 4.17 são mostradas as curvas filtração para o sistema independente e intermitente em comparação ao sistema estático. As linhas contínuas representam os pontos de colmatação. Os ajustes das curvas de filtração estão expostos no Apêndice A.



(a)



(b)

Figura 4.17: Queda de pressão em relação à massa de pó acumulada por unidade de área para os sistemas com vibrações independentes (a) e intermitentes em comparação ao sistema estático (b); polvilho doce.

Observa-se que tanto o sistema estático quanto aos sistemas submetidos à vibração mecânica, apresentaram os três comportamentos característicos da formação da torta de

filtração que são: filtração de profundidade, filtração superficial e formação da torta de filtração com formato em "S". A filtração de profundidade é caracterizada pela concavidade da curva de filtração para cima que, segundo Azevedo (2009), representa um ciclo de filtração com formação mais lenta da torta de filtração, indicando um período maior na filtração de profundidade. Em seguida, um comportamento linear, o que apontou para uma filtração de caráter superficial e por último, a inversão da curvatura, caracterizando numa rápida formação da torta de filtração, sendo a própria torta de filtração, o novo meio filtrante.

Note-se que o sistema estático apresentou uma maior filtração de profundidade e uma menor perda de carga no meio filtrante, sendo que para o sistema independente e sistema intermitente, a etapa de filtração de profundidade foi menor, com exceção de f: 12 Hz intermitente que apresentou valor semelhante ao sistema estático. Isso sugere dizer que a vibração mecânica influenciou na formação inicial da torta de forma que possa ter causado um maior empacotamento das partículas no interior do meio filtrante, diminuindo sua permeabilidade.

Os valores da quantidade de massa inicial para a formação da torta foram de 0,750 kg/m² para o sistema estático (f: 0 Hz), 0,525 kg/m² para 12 Hz, 0,525 kg/m² para 17 Hz, 0,750 kg/m² para 12 Hz intermitente, 0,300 kg/m² para 17 Hz intermitente.

Esse acúmulo de pó necessário para o início da formação da torta é denominado de ponto de colmatação e é representado pelas linhas tracejadas. Na Figura 4.17, o ponto de colmatação, de acordo com Wash (1996), consiste no lugar geométrico obtido para o cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas em que é obtida a massa de pó necessária para a formação da torta.

O sistema estático atingiu a queda de pressão máxima mais rapidamente que o sistema com efeito de vibração independentes e tortas de filtração com menores quantidades de material particulado por unidade de área, sendo 2,84 kg/m² para o sistema estático, de 3,45 kg/m² para a vibração de 12 Hz e de 3,24 kg/m² para a vibração de 17 Hz, 3,35 kg/m² para a vibração de 12 Hz intermitente e 3,63 kg/m² para a vibração de 17 Hz intermitente, resultando em 21,48%, 14,09%, 17,57% e 27,82% maiores, respectivamente.

Assim, foi realizado um tratamento estatístico através de um Teste de Hipótese afim de verificar se havia diferença significativa entre as massas da torta de filtração para o sistema estático e com vibração mecânica.

A hipótese de nulidade é dada por H_0 e decorre da suposição que a diferença entre as amostras é nula. Assim, a hipótese nula foi baseada na igualdade entre as massas das tortas de

filtração e hipótese alternativa denotada por H_1 consiste na afirmação que deve ser verdadeira se a hipótese nula for falsa.

Nesse caso, a hipótese alternativa foi verificar que houve a diferença entre as massas das tortas de filtração. O intervalo de confiança foi de 95%, ou seja, $\alpha=0,05$ e a probabilidade do erro dada por p .

- H_0 : igualdade das massas das tortas de filtração
- H_1 : diferença entre as massas das tortas de filtração

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Na Tabela 4.12 podem-se ser encontrados os valores para p em relação ao sistema estático e com vibração mecânica.

Tabela 4.12: Teste de hipóteses para as massas das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibração para o polvilho doce.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>				
	0	12	17	12	17
				intermitente	intermitente
0	-	0,0041	0,1695	0,0632	0,0052

A Tabela 4.12 mostra que as frequências de vibração de 12 Hz independente e 17 Hz intermitente foram as que apresentaram como hipótese alternativa verdadeira, na qual tiveram diferenças estatísticas significativas entre as massas das tortas de filtração. As frequências de 17 Hz independente e 12 Hz intermitente apresentaram a hipótese de nulidade verdadeira. Isso sugere dizer que não há diferença entre as massas das tortas de filtração para essas frequências e que o sistema de vibração concomitante à operação de filtração não é viável.

Foram avaliados os comportamentos de outras respostas na operação de filtração como força de arraste no meio filtrante, espessura, porosidade e resistência específica da torta para as frequências que apresentaram diferenças estatísticas.

Diante à Figura 4.18 há variação do arraste do meio filtrante em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências de 0, 12 Hz e 17 Hz intermitente. Os valores encontrados pelo arraste do meio filtrante nessas condições para o polvilho doce foram poucos superiores ao sistema estático, apresentando comportamentos das curvas bem próximos entre si.

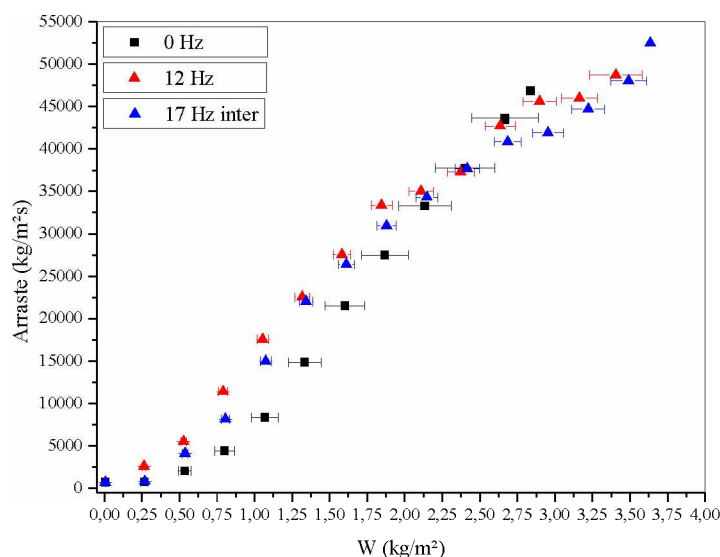


Figura 4.18: Arraste em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências 0, 12 e 17 Hz intermitente; polvilho doce.

Para verificar se havia diferenças estatísticas significativas entre os arrastes dos meios filtrantes, para os dois sistemas de filtração estático e com vibração, foi realizado um Teste de Hipótese sob a avaliação de:

Hipóteses:

- H_0 : igualdade dos arrastes do meio filtrante;
- H_1 : diferenças entre os arrastes do meio filtrante.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.
-

Na Tabela 4.13 é possível encontrar os valores para *p-value*, com intervalo de confiança de 95%. Através da Tabela 4.13 percebe-se que a hipótese que há igualdade nas forças de arrastes do meio filtrante entre o sistema estático e com vibração mecânica é verdadeira. Isso sugere dizer que a vibração mecânica apresentou mesmo comportamento do sistema estático perante a resistência do meio filtrante ao atingir a queda de pressão máxima de 10000 Pa.

Tabela 4.13: Teste de hipótese para o arraste do meio filtrante para os sistemas estático e com vibração; polvilho doce.

<i>p-value</i>			
Frequência (Hz)	0	12	17
			intermitente
0	-	0,7309	0,3417

Pôde-se obter informações quanto à espessura da torta em relação à massa de pó acumulada por unidade de área na Figura 4.19 para o sistema de filtração operando às vibrações de 0 Hz, 12 Hz e 17 Hz intermitente.

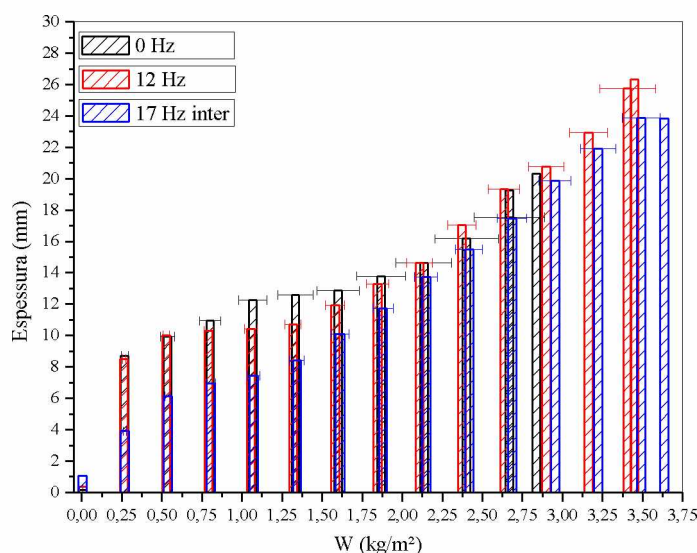


Figura 4.19: Espessura da torta em função da massa de pó acumulada por unidade de área para as frequências 0, 12 e 17 Hz intermitente; polvilho doce.

Um Teste de Hipótese foi realizado para verificar se havia diferenças estatísticas significativas entre as espessuras das tortas para os dois sistemas de filtração: estático e com vibração. Foi realizado um Teste de Hipótese considerando que:

Hipóteses:

- H_0 : igualdade nas espessuras das tortas;
- H_1 : diferenças entre as espessuras das tortas.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 era verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 era verdadeira.

Na Tabela 4.14 é possível encontrar os valores de p-value para intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.14: Teste de Hipótese para as espessuras das tortas para os sistemas estático e com efeito de vibração; polvilho doce.

<i>p-value</i>			
Frequência (Hz)	0	12	17
			intermitente
0	-	0,0002	0,0071

Observa-se na Tabela 4.19 que o valor de p adotado foi menor que 0,05, indicando que a hipótese alternativa (H_1) é verdadeira e que há diferença entre as espessuras das tortas obtidas no sistema estático em relação ao sistema com influência de vibração mecânica.

Percebe-se na Figura 4.19 que os sistemas com vibrações mecânicas ao atingirem a queda de pressão máxima estabelecida em 10000 Pa proporcionaram a formação de tortas mais espessas que o sistema estático. Isso sugere que as vibrações mecânicas causaram um rearranjo favorável na acomodação das partículas entre elas de tal forma que possibilitaram um maior comprimento de torta.

Foi analisada a influência da vibração mecânica nas respostas das resistências específicas da torta e das porosidades médias das tortas de filtração em comparação ao sistema estático através do Teste de Hipótese sob as condições das hipóteses e probabilidade do erro:

- H_0 : igualdade nas resistências específicas das tortas;
- H_1 : diferenças entre as resistências específicas das tortas.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Porosidade

- H_0 : igualdade nas porosidades das tortas;
- H_1 : diferenças entre as porosidades das tortas.

Probabilidade do erro:

- Se $p > 0,05$, H_0 é verdadeira
- Se $p < 0,05$, H_1 é verdadeira.

Na Tabela 4.15 é possível encontrar os valores de *p-value* para intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.15: Teste de Hipótese para as resistências específicas das tortas para os sistemas estático e com efeito de vibração; polvilho doce.

<i>p-value</i>			
Frequência (Hz)	0	12	17
			intermitente
0	-	0,0363	0,0960

A Tabela 4.15 mostra que a frequência de 12 Hz teve valor de p menor que 0,05, demonstrando que a hipótese H_1 é verdadeira, em que há diferenças estatísticas significativas em relação às resistências específicas das tortas em comparação ao sistema estático.

Dessa forma, na Figura 4.20 é possível observar a resistência específica das tortas em função da massa de pó acumulada por unidade para as frequências de 0 e 12 Hz. Percebe-se que o sistema com vibração, ao atingir a queda de pressão máxima estabelecida de 10000 Pa formou-se tortas menos resistentes quando comparadas com o sistema estático.

A resistência específica da torta para a frequência de 12 Hz foi um pouco maior que o sistema estático até atingir a quantidade de massa acumulada por unidade de área de 2,0 kg/m², sendo que após esse valor tornou-se menos resistente que o sistema estático. Uma possível

justificativa estar relacionada a possibilidade de surgimento de lacunas na estrutura da torta que possibilitasse que a torta de se tornasse menos resistente e, provavelmente, uma maior porosidade e maior espessura.

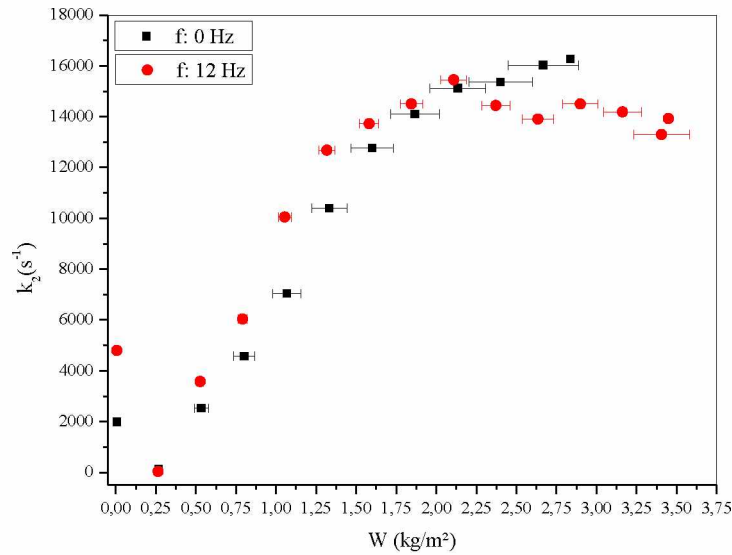


Figura 4.20: Resistência Específica da torta em função da massa de pó acumulada por unidade de área; polvilho doce.

Na Tabela 4.16 é possível encontrar os valores de *p-value* para intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.16: Teste de Hipótese para as porosidades médias das tortas para os sistemas estático e com efeito de vibração; polvilho doce.

<i>p-value</i>			
Frequência (Hz)	0	12	17
			intermitente
0	-	0,0158	0,4515

A Tabela 4.16 mostra que a frequência de 12 Hz teve valor de *p* menor que 0,05, demonstrando que a hipótese H_1 é verdadeira, em que há diferenças estatísticas significativas em relação às porosidades médias das tortas em comparação ao sistema estático. Já a frequência de 17 Hz intermitente comportou-se semelhante ao sistema estático.

Foi possível observar na Figura 4.21 que o decréscimo da porosidade da torta de filtração ocorreu tanto para a frequência de 0 Hz quanto para frequência de 12 Hz à medida que se

aumentava a carga mássica. Isso pode ser justificado devido ao fato do aumento da queda de pressão proporcionar maior compactação das tortas de filtração, diminuindo a distância entre as partículas e reduzindo os espaços vazios para a passagem do ar (NUNES, 2011).

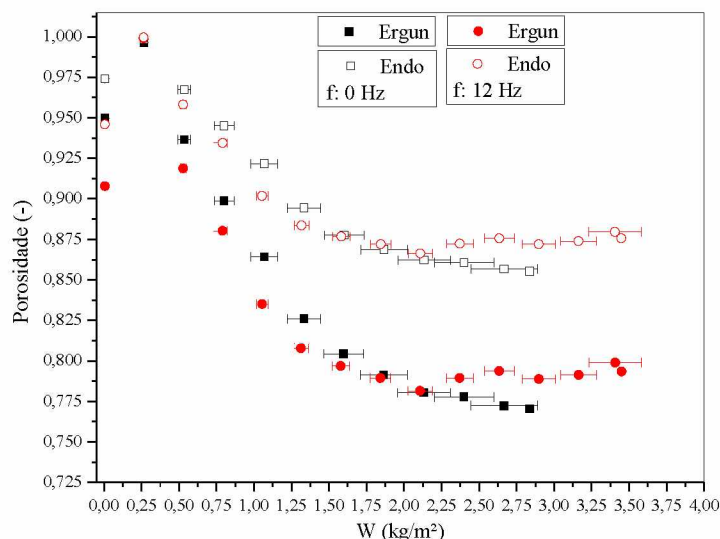


Figura 4.21: Porosidade das tortas de filtração em função da massa de pó acumulada por unidade de área; polvilho doce.

CHOI et al. (2004) justificaram que, à medida que aumentam a quantidade de massa acumulada por área, há a compressão das camadas de pó inferiores (interface tecido-torta) pelas camadas superiores, na qual a porosidade da torta e espessura das camadas formadas são reduzidas com o aumento da carga mássica.

As curvas para a equação de Endo et al (1989) apresentaram valores de porosidade maiores que os encontrados pela correlação de Ergun (1952) devido considerar as características geométricas das partículas como o desvio geométrico. Essas equações permitem estimar a porosidade das tortas de filtração de gases formadas por partículas muito menores, número de Reynolds da ordem de 10^{-2} e partículas com esfericidade menor que 1. O que pode ser comprovado pelos trabalhos de Aguiar (1995 e Silva Neto et al., (2002) em que determinaram a porosidade da torta pelo método direto (experimental) e indireto e constataram que boa aplicabilidade dessas equações.

Observa-se ainda na Figura 4.21 um aumento da porosidade nos instantes iniciais da filtração tanto para o sistema sem vibrar quanto no sistema com vibração mecânica. Isso pode ser justificado pelo fato das correlações serem aplicadas sob a condição hipotética de que a formação da torta é instantânea, não considerando a filtração interna na qual as partículas se

depositavam nos interstícios das fibras (AZEVEDO, 2009). Ainda, segundo Arouca (2014) a condição de uso dessas correlações é válida próximo ao ponto de colmatagem da torta, na qual pode ser visto que houve o decréscimo da porosidade da torta de filtração com o aumento da carga mássica.

A porosidade das tortas como pode ser observada, ao atingir a queda de pressão máxima estabelecida em 10000 Pa, foi maior para sistema com vibração de 12 Hz que para o sistema estático. Isso sugere que a vibração pode ter intensificado o surgimento de lacunas durante a deposição das partículas, umas sobre as outras, fazendo com que diminuísse a resistência específica da torta e aumentasse a porosidade e o acúmulo de pó no meio filtrante (AZEVEDO, 2009). Outra possível justificativa, segundo Fagnoli (2010) está relacionada ao efeito da compressibilidade da torta de filtração, uma vez que a porosidade da torta tende a ser maior à medida que se aproxima da interface torta-ar, em que, uma torta mais espessa teria uma região mais porosa maior. Isso sugere dizer que a vibração pode ter intensificado esse efeito de compressibilidade quando comparado com o sistema sem vibrar.

4.3.1 - Forças de adesão

A Figura 4.22 representa a primeira etapa da metodologia de *Seville et al.* (1989) utilizada para a determinação da força de adesão.

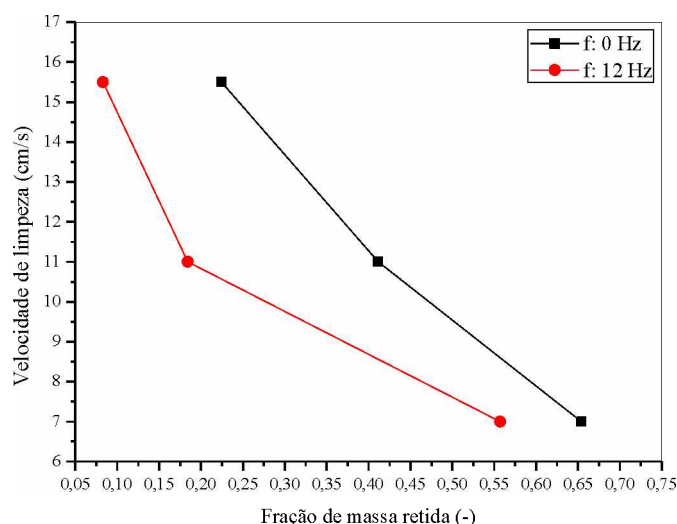


Figura 4.22: Velocidade de limpeza em função da fração de massa retida.

Nessa etapa avaliou-se a influência das velocidades de limpeza na operação de remoção da torta de filtração para o sistema com efeitos da vibração de 12 Hz e estático, visto que, apresentou diferenças estatísticas significativas em relação à porosidade e resistência específica da torta.

Na Figura 4.22 foi possível perceber que a frequência com vibração contínua de 12 Hz apresentou maior valor de massa desprendida entre a primeira e segunda velocidade de limpeza em relação ao sistema estático. Entre a segunda e terceira velocidade de limpeza, a frequência de 12 Hz apresentou também uma maior eficiência no desprendimento da torta da torta quando comparada ao sistema estático. Nota-se que após à operação de limpeza, constatou-se que o sistema com vibração de 12 Hz apresentou uma maior eficiência de regeneração do meio filtrante, com uma diferença de quantidade de massa retida no tecido de 0,474 e do sistema com vibração de 0 Hz com 0,423. Isso sugere dizer que o sistema de vibração influencia na acomodação das tortas de forma que possibilite, possivelmente, o surgimento de lacunas em sua estrutura, de forma que formem tortas menos resistentes, mais espessas e uma região mais porosa maior que o sistema sem vibrar.

Na Figura 4.23 é representada a fração de massa retida em função da queda de pressão na limpeza para o sistema estático e com efeito de vibração.

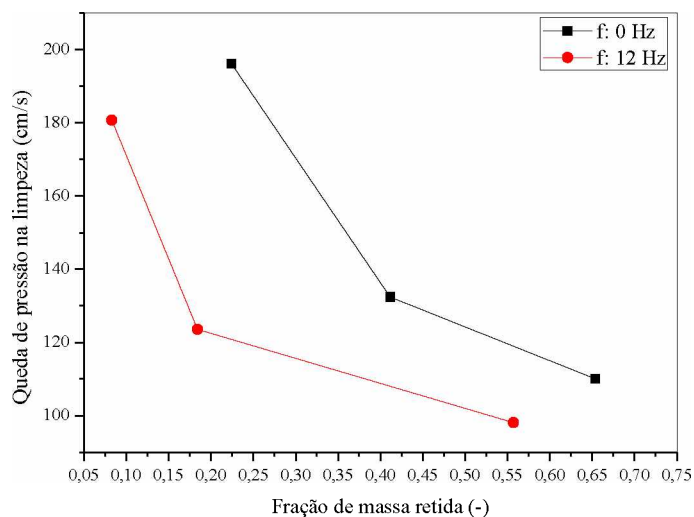


Figura 4.23: Queda de pressão na limpeza em função da fração de massa retida para os sistemas com vibração e estático.

Nota-se na Figura 4.23 que as quedas de pressão nas limpezas nas tortas de filtração para sistema com influência da vibração de 12 Hz apresentaram menores valores que o sistema

estático após as três velocidades de limpeza em consequência da menor fração de massa retida no meio filtrante.

A Figura 4.24 apresenta o gráfico de queda de pressão na limpeza por velocidade de limpeza através da metodologia de Seville et al (1989) em que se realiza uma regressão linear dos pontos obtidos por interpolação encontrados nas Figuras 4.21 e 4.22.

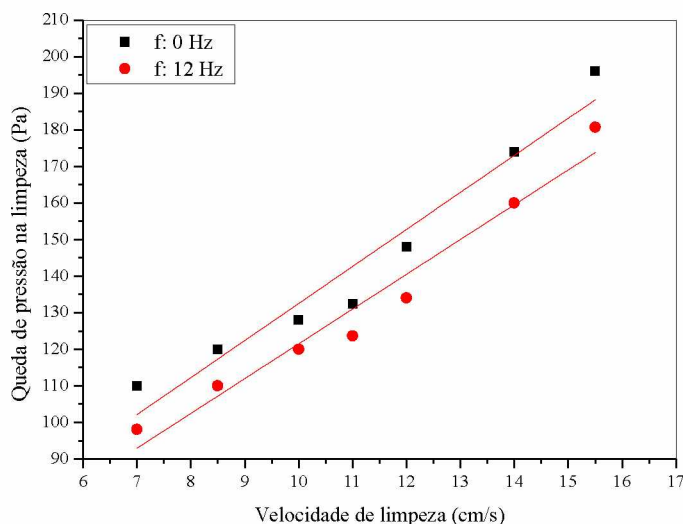


Figura 4.24: Queda de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza para os sistemas com vibração e estático; polvilho doce.

Na Tabela 4.17 encontram-se os valores das resistências específicas do filtro (k_1), das tensões de remoção da torta e das forças de adesão (F_c) para o sistema estático e com efeito de vibração contínua, coeficientes de correlação (R^2) e massa de pó acumulada por unidade de área (W).

Tabela 4.17: Forças de adesão encontradas para o sistema com e sem efeito de vibração para o polvilho doce.

$V_f(\text{m/s})$	f (Hz)	W (kg/m ²)	R^2	k_1 (N.s/m ³)	σ_R (N/m ²)	$F_c(\text{N})$
0,10	0	2,83	0,9513	10,129	31,206	0,48
	12	3,45	0,9513	9,5127	26,338	0,41

Na expressão dada por $Y = A + Bx$, o coeficiente linear corresponde à tensão de ruptura da torta (σ_R) e o coeficiente angular trata-se da resistência específica do meio filtrante (k_1). Por

meio dessas retas foi possível determinar as forças de adesão para os sistemas estático e com efeito de vibração contínua e o coeficiente de correlação (R^2).

Na Tabela 4.17 percebe-se que o sistema que apresentou menor força de adesão das partículas ao meio filtrante foi o sistema com vibração mecânica com a frequência de 12 Hz em relação ao sistema estático. A resistência específica do meio filtrante também foi menor no sistema com vibração mecânica.

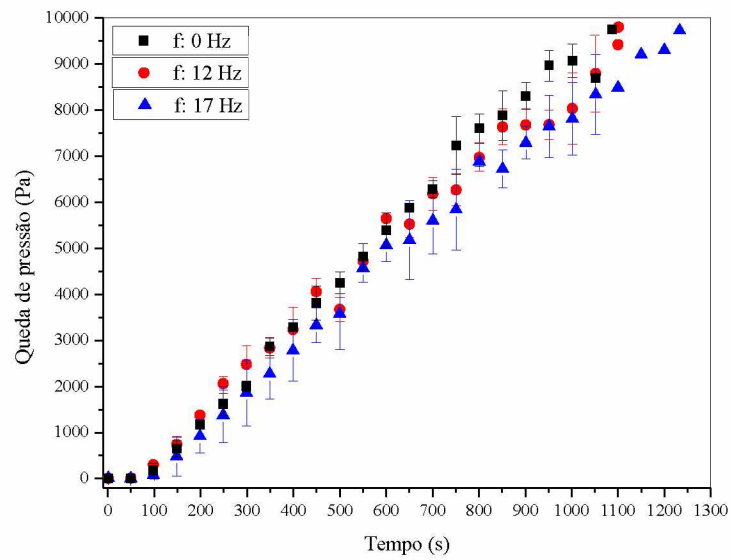
Dessa forma, pode-se dizer que a operação de filtração de gases com vibração mecânica concomitante, influenciou na formação e remoção das tortas de filtração formadas pelo material particulado, o polvilho doce, com tortas de maiores comprimentos ou espessuras, menos resistências específicas das tortas e com regiões mais porosas maiores que o sistema estático e, possibilitou, durante a operação de remoção das tortas com fluxo de ar reverso, com as velocidades de limpeza de 7, 11 e 15,5 cm/s, maiores desprendimentos de tortas com menores quedas de pressão nas limpezas, tornando-se favorável sua utilização no processo.

Assim, pretendeu-se através dos resultados acima, a realização de ciclos de filtração com o polvilho doce e com a frequência de vibração de 12 Hz em comparação ao sistema estático para verificar a influência da vibração mecânica durante a formação e remoção das tortas de forma cíclica.

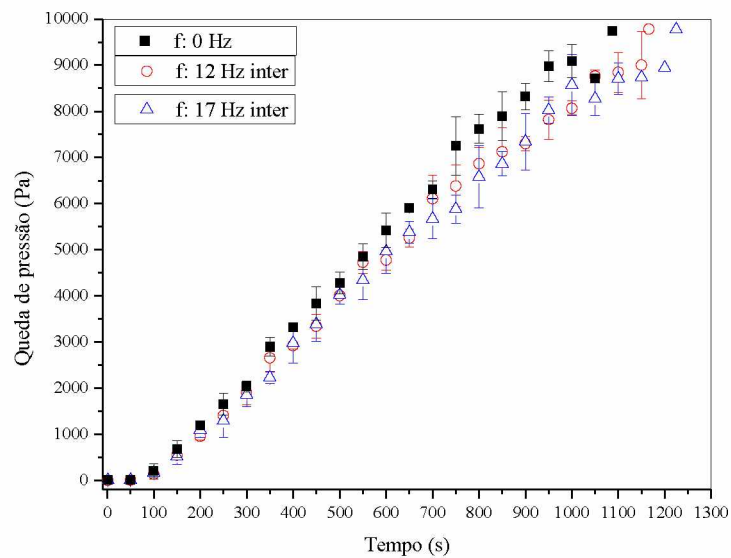
4.4 Ensaios de filtração de gases com talco puro

Os ensaios de filtração foram realizados com uma velocidade de filtração de 0,10 m/s, para uma mesma queda de pressão máxima de, aproximadamente, 10000 Pa, com vazão mássica de 0,183 g/s para o material particulado talco puro e foram avaliados os efeitos das frequências de 0, 12 e 17 Hz sistema independente e 12 Hz e 17 Hz sistemas intermitentes com o objetivo de avaliar as respostas das variáveis da torta de filtração em relação ao tempo de filtração (s), massa de pó acumulada por unidade de área (kg/m^2) e a análise de um teste de hipótese para verificar se o sistema com vibração mecânica influenciou na formação das tortas de filtração em relação ao sistema estático.

A Figura 4.25 representa o tempo necessário para a formação das tortas de filtração, para uma queda de pressão de, aproximadamente, 10000 Pa, a uma velocidade superficial de filtração de 0,10 m/s tanto para o sistema estático (f:0 Hz) quanto para o sistema submetido às frequências de vibração, caracterizado em independentes (vibração contínua de 12 e 17 Hz) e sistema intermitente(12 e 17 Hz).



(a)



(b)

Figura 4.25: Tempo de filtração para o sistema estático em comparação aos sistemas (a) independentes e (b) intermitentes.

Observou-se na Figura 4.25 que o acréscimo da queda de pressão foi acompanhado pelo tempo de filtração, apresentando um comportamento típico de curvas de filtração, ou seja, com o passar do tempo, tem-se maior acúmulo de pó no tecido e, consequentemente, o acréscimo da perda de carga no filtro para uma mesma queda de pressão

e que para o sistema com vibração, ambos, apresentaram uma menor inclinação da curva, caracterizando em uma menor perda de carga em um mesmo tempo de filtração em relação aos sistema estático.

Os ensaios de filtração para os sistemas sob influência das frequências de vibração (f: 12 Hz - t: 1101s), (f: 17 Hz - t: 1233s) e sistema híbrido (f: 12 Hz - t: 1166s) e (f: 17 Hz - t: 1225s) apresentaram tempos de filtração pouco superiores ao sistema estático (f: 0 Hz, t - 1087s), sendo 1,29%, 13,43%, 7,27% e 12,69% maiores, respectivamente.

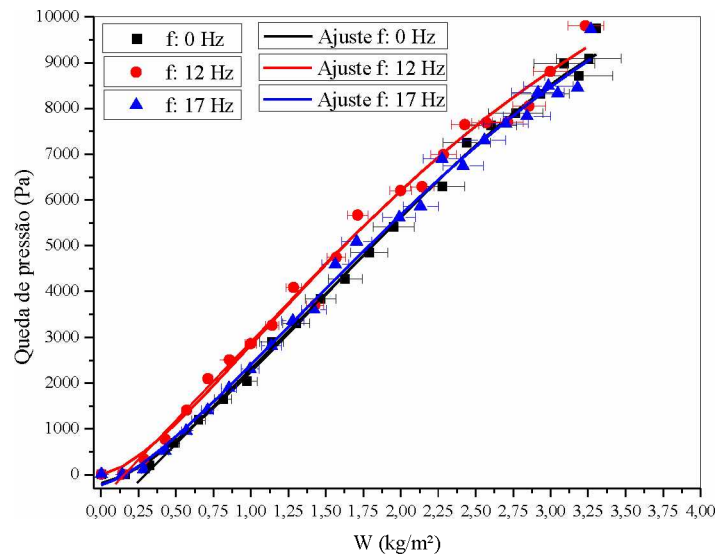
Na Figura 4.26 foi mostrado a relação da queda de pressão no meio filtrante (Pa) em função da quantidade de material particulado depositada por unidade de área (W) para o sistema com vibrações mecânicas independentes e intermitentes.

Pode-se observar na Figura 4.26 que as curvas de filtração tanto para o sistema estático quanto para o sistema com vibrações mecânicas apresentaram, inicialmente, concavidade voltada para cima, caracterizada por filtração de profundidade em que há a penetração das partículas no interior do meio filtrante e, em seguida, um comportamento linear denominado de filtração de transição em que há a formação dos dendritos (THOMAS et al., 2001) e, por último, uma inversão da curva de filtração no final dos ensaios, com concavidade voltada para baixo, o que indicou uma rápida formação da torta de filtração com distribuição uniforme e, conseqüentemente, uma rápida queda de pressão no filtro. Essa etapa é denominada de filtração superficial (KANAOKA et al., 2006).

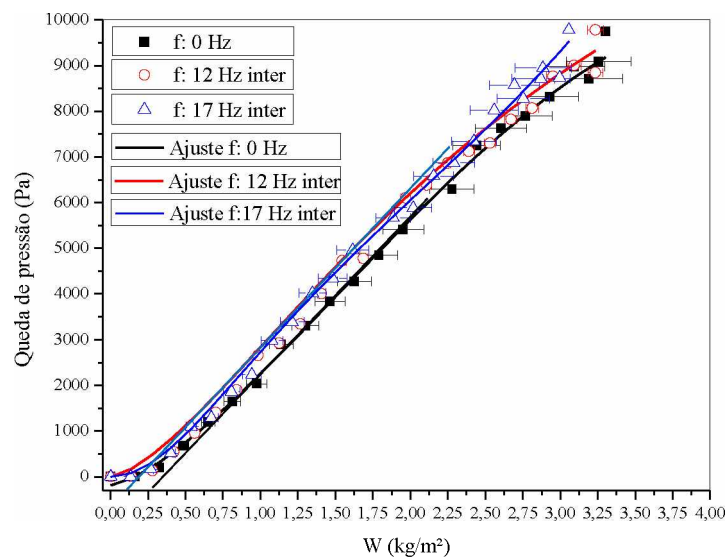
O sistema estático apresentou uma carga mássica média de 3,302 kg/m², o sistema com vibrações independentes de 12 e 17 Hz apresentaram 3,233 Kg/m² 3,267 kg/m², respectivamente, com uma quantidade de pó necessária para o início da formação da torta (ponto de colmatação) de 0,250 kg/m² para os sistemas estático e com influência de vibração de f: 17 Hz independente e de 0,125 kg/m² para a vibração de f: 12 Hz independente. Isso sugere que o sistema com vibração independente se comportou como o sistema estático em relação à quantidade de massa acumulada por unidade de área para uma queda de pressão máxima a ser atingida de 10000Pa.

A formação inicial das tortas para o sistema com vibrações intermitentes de 12 e 17 Hz foi de 0,125 kg/m², 0,190 kg/m², respectivamente, e de 0,250 kg/m² para o sistema estático. Nota-se que o sistema com vibração apresenta menor período de filtração de profundidade e que as quantidades de massas acumuladas por unidade de área para que fosse atingida a queda de pressão máxima de 10000 Pa foram de 3,301 kg/m² para o sistema estático, 3,235 kg/m² para f: 12 Hz intermitente e 3,058 kg/m² para f: 17 Hz intermitente. Isso sugere que dizer as frequências

de vibração intermitente, da mesma forma que as do sistema independente, apresentaram comportamentos semelhantes ao sistema estático em relação à quantidade de massa acumulada por unidade de área. Os ajustes das curvas de filtração estão expostos no Apêndice A.



(a)



(b)

Figura 4.26: Massa de pó acumulada por unidade de área para os sistemas com vibrações independentes (a) e intermitentes (b) em comparação ao sistema estático.

Devido a relação de proximidade do comportamento do sistema estático com os sistemas com efeitos de vibrações mecânicas foi necessária a realização de um Teste de Hipóteses para avaliar se havia diferenças estatísticas significativas, com *p-value* de 0,05 e intervalo de confiança de 95%, em relação aos valores de massa de torta de filtração.

O procedimento do Teste de Hipótese foi o mesmo adotado para o material particulado rocha fosfática em que apresentou como hipótese de nulidade (H_0) consistia na igualdade das massas das tortas e a hipótese alternativa (H_1) na diferença entre as massas, na qual foi considerado que:

- Se $p > 0,05$, H_0 era verdadeira;
- Se $p < 0,05$, H_1 era verdadeira.

Os valores encontrados para *p-value* são apresentados na Tabela 4.18

Tabela 4.18: Teste de Hipótese para a massa das tortas de filtração para os sistemas estático e com efeitos de vibrações mecânicas; talco puro.

Frequência (Hz)	<i>p-value</i>				
	0	12	17	12 intermitente	17 intermitente
0	-	0,1295	0,1676	0,3346	0,0912

Através da Tabela 4.18 é possível observar que, para todas as frequências utilizadas no sistema com vibração mecânica, para o material particulado talco puro, em relação ao sistema estático, apresentaram $p\text{-value} > 0,05$, demonstrando que a hipótese de nulidade é verdadeira, ou seja, as massas das tortas tanto para o sistema estático quanto para o sistema com vibração são iguais. Isso sugere dizer que o sistema com vibrações mecânicas independentes ou intermitentes concomitantes à operação de filtração de gases não influenciou em sua formação, sendo desnecessário o acoplamento de um sistema de vibração mecânica.

4.5 - Ciclos de filtração

Na Figura 4.27 mostra os resultados para a queda de pressão durante os 5 ciclos de filtração para o sistema estático e com vibração e a limpeza por fluxo de ar reverso. As 5 curvas mostram o aumento da queda de pressão com o aumento da carga mássica, para uma velocidade de filtração de 10 cm/s, queda de pressão máxima de 10000 Pa e velocidade de limpeza de 15,5 cm/s.

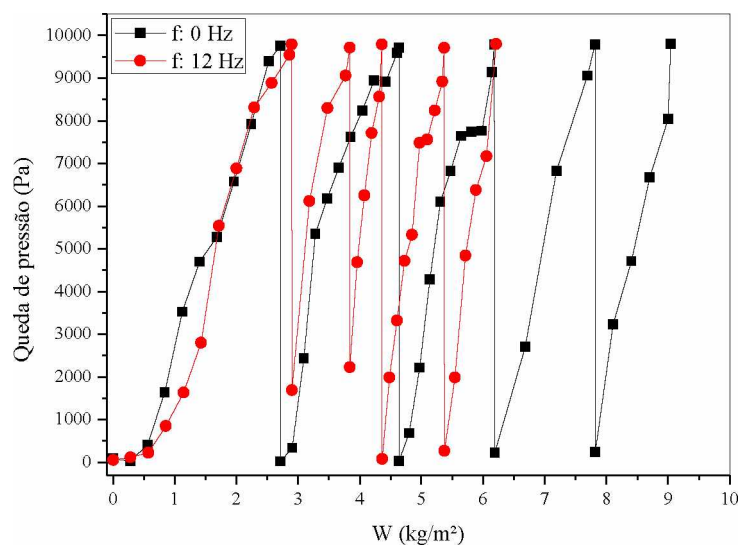


Figura 4.27: Comparação da massa acumulada por unidade de área entre os sistemas estático e com vibração para os 5 ciclos, polvilho doce.

A Figura 4.27 mostra a relação da queda de pressão por massa de pó acumulada por unidade de área para os cinco ciclos de filtração, polvilho doce. É possível verificar que no primeiro ciclo tanto para o sistema estático quanto para o sistema com vibração mecânica houve um período de filtração interna. Esse comportamento para o sistema estático, ainda que menor, permaneceu nos ciclos 2 e 3, tornando linear nos ciclos 4 e 5.

Já para o sistema com vibração mecânica, a linearidade foi predominante, com uma menor quantidade de massa acumulada por unidade de área para os ciclos 2 e 3. Isso pode ser justificado pelo fato da vibração mecânica ter formado tortas de filtração mais compactadas que o sistema estático no interior do meio filtrante e entre elas, como pode ser visto pela maior queda de pressão residual nos ciclos 2 e 3, além da retenção de partículas após cada ciclo de filtração e limpeza, o que possibilita uma menor massa coletada por área.

Nota-se que, após a operação de limpeza no ciclo 3, teve-se uma menor perda de carga residual, porém com menor quantidade de massa coletada. A operação de limpeza interferiu na estrutura de formação da torta de filtração nos ciclos 4 e 5 com maior acomodação das partículas no tecido e entre elas em relação aos ciclos anteriores.

Na Figura 4.28 é possível observar que o sistema com vibração possibilitou menor quantidade de massa de acumulada por unidade de área de ciclo após ciclo quando comparados com o sistema estático. Isso sugere dizer que a vibração, nos estudos de ciclos, proporcionou um rearranjo desfavorável das partículas no meio filtrante e entre elas, formando tortas com menores comprimentos.

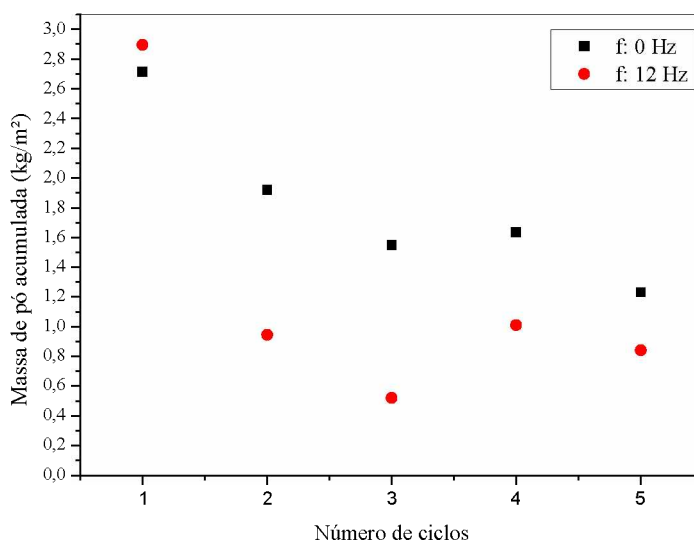


Figura 4.28: Comparação da massa acumulada por unidade de área entre os sistemas estático e com vibração para os 5 ciclos, polvilho doce.

Na Figura 4.29 mostra que houve maior desprendimento de massa para o sistema estático em todos os ciclos quando comparados com o sistema com vibração. Nota-se que há uma estabilização do desprendimento da torta após a limpeza no sistema com vibração mecânica. Isso pode estar relacionado à maior compactação das tortas sob o efeito da vibração mecânica de 12 Hz.

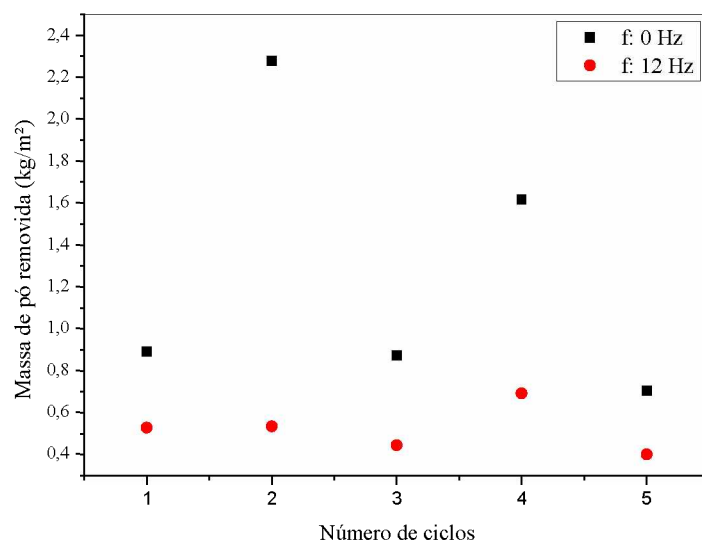


Figura 4.29: Massa de pó removida por unidade de área para o sistema estático e com vibração para os 5 ciclos de filtração, polvilho doce.

Na Figura 4.30 consegue-se analisar a quantidade de massa retida para os dois sistemas.

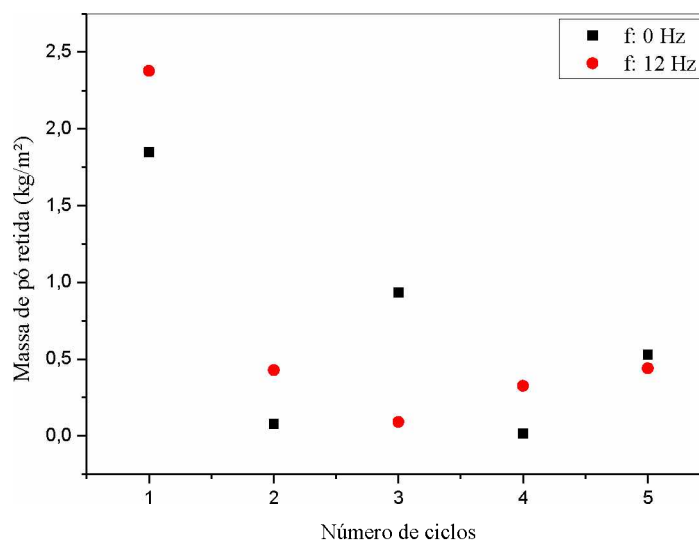


Figura 4.30: Massa de pó retida por unidade de área para o sistema estático e com vibração para os 5 ciclos de filtração, polvilho doce.

Observa-se que, com exceção do ciclo 3 e o ciclo 5 em que houve maior massa retida para o sistema estático devido a maior quantidade de massa acumulada por área, o sistema com vibração apresentou com maior quantidade de massa retida que o sistema estático, em

consequência do rearranjo desfavorável das partículas no tecido e entre elas, ocasionando uma maior perda de carga residual para os três primeiros ciclos, levando a uma estabilização nos ciclos 4 e 5. Isso pode ser por causa do efeito da operação de limpeza por fluxo de ar reverso que tenha influenciado na acomodação das partículas no interior do meio filtrante, rearranjando-as.

Na Figura 4.31 é possível observar a queda de pressão residual foi maior para sistema com vibração nos três primeiros ciclos, sendo que do quarto para o quinto ciclo, a quantidade de massa retida no sistema com vibração para o estático se aproximaram e, apresentando, praticamente a mesma queda de pressão residual no meio filtrante após as operações de limpeza. Pode-se dizer que a limpeza por fluxo de ar reverso influenciou na deposição das partículas no meio filtrante de forma que o sistema com vibração tendeu a normalizar com o sistema estático, apresentando comportamentos semelhantes.

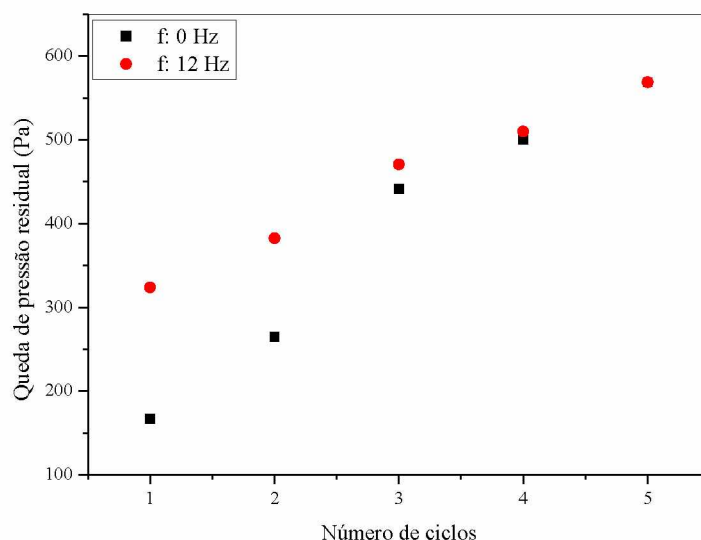


Figura 4.31: Queda de pressão residual para os 5 ciclos de filtração para o sistema estático e com vibração, polvilho doce.

Assim, sugere-se que sejam realizados testes experimentais com o material particulado o polvilho doce com maior número de ciclos para verificar a influência da vibração mecânica na regeneração do meio filtrante, visto que, nos primeiros ciclos, a vibração mecânica causou uma queda de pressão residual e massa de pó retida e, em seguida, tendeu a se estabilizar com o sistema estático.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES FUTURAS

Este capítulo traz as conclusões encontradas neste trabalho sobre a influência da vibração mecânica concomitante à operação de filtração e as sugestões de trabalhos futuros para a melhoria da operação de filtração e da unidade experimental.

ROCHA MOÍDA

- As curvas de filtração tanto para o sistema estático quanto para os sistemas com vibrações apresentaram comportamentos típicos da operação de filtração de gases com concavidade da curva voltada para cima.
- As frequências de vibração de 0, 6, 7, 12, 14 e 19 Hz apresentaram pontos de colmatação discretamente superiores ao sistema estático. Os pontos de colmatação semelhantes entre si estão relacionados ao comportamento motor vibrador em que apresenta movimentos periódicos compostos por séries de movimentos harmônicos simples descritos por uma função senoidal.
- As vibrações mecânicas com frequências de 12, 17 e 18 Hz exigiram do sistema de filtração maiores forças de arraste do filtro que o sistema estático. Conclui-se que as vibrações mecânicas proporcionaram maior acomodação das partículas no tecido e entre elas, formando tortas mais densamente empacotadas, minimizando a permeabilidade do meio filtrante.
- As vibrações mecânicas com frequências de 12, 17 e 18 Hz causaram a formação de tortas com maiores resistências específicas, menores espessuras e menores porosidades que o sistema estático devido ao maior empacotamento das partículas nos interstícios das fibras, em que as camadas finas de tortas são encolhidas pelas camadas mais novas através das forças de compressão advindas das camadas sucessoras.
- As frequências de vibração de 12, 17 e 18 Hz proporcionaram a formação de tortas de filtração com maiores forças de adesão e resistência do filtro quando comparadas ao sistema estático. Conclui-se que as vibrações mecânicas não proporcionaram o desprendimento da torta para o material particulado rocha fosfática moída cuja circularidade é de 0,60.

POLVILHO DOCE

- As curvas de filtração tanto para o sistema estático quanto com vibrações mecânicas apresentaram formato em “S” e com maiores tempos de filtração que o sistema estático.
- A vibração mecânica de 12 Hz proporcionou a formação de tortas mais espessas, menos resistentes e com região mais porosa maior para as partículas de polvilho doce cuja circularidade é de 0,98, e com menores forças de adesão e resistência específica do filtro.

- TALCO PURO

- As partículas de talco puro não foram muito sensíveis aos efeitos da vibração mecânica, pois apresentaram pontos de colmatação semelhantes e quantidade de massa de pó acumulada por unidade de área bem próximas, não apresentando diferenças estatísticas significativas em relação ao sistema estático quanto às massas das tortas de filtração, ou seja, não mostrou-se eficiente e eficaz ao trabalhar com material particulado de circularidade próxima a 0,67.

CICLOS DE FILTRAÇÃO

- Os ciclos de filtração para o polvilho doce possibilitaram a formação de tortas mais compactadas e com maior queda de pressão residual nos três primeiros ciclos, mas tenderam a uma estabilização nos dois últimos ciclos.
- A operação de limpeza influenciou na deposição das partículas no meio filtrante nos ciclos de filtração, sendo necessário o estudo com maiores números de ciclos.

A influência da vibração mecânica concomitante à operação de filtração de gases não foi eficaz para os três materiais particulados, não possibilitando o desprendimento da torta parcial ou total durante o processo, porém, mostrou-se resultados mais satisfatórios para as partículas com circularidade próxima a 1.

SUGESTÕES FUTURAS

- Adaptação da unidade experimental para que seja possível a retirada automática do acúmulo de material particulado na câmara de filtração;
- Avaliar a penetração das partículas no meio filtração com o efeito de vibrações mecânicas e avaliação da estrutura das tortas por microscopia;
- Estudar a influência da vibração mecânica longitudinal ao fluxo com maiores números de ciclos de filtração;
- Avaliar por fluidodinâmica computacional, os efeitos da vibração nas operações de formação e remoção de tortas para diferentes materiais particulados e filtros;
- Realizar os experimentos de filtração de gases com parâmetros de operação industrial em relação à variação de queda de pressão, vazão mássica e velocidade de filtração.
- Adaptar a unidade experimental para estudo com gaiola de filtração de gases para verificar o efeito da vibração mecânica em protótipos de filtros de manga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. L. Filtração de ar em filtros de tecido. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, 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 de Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.

AROUCA, A. M. M. Efeito da vibração mecânica perpendicular na formação e remoção de tortas de filtração de aerossóis. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE NÃO-TECIDOS E TECIDOS TÉCNICOS. Disponível em <<http://www.abint.org.br>>. Acesso em 2015.

ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES. Verificação de meios de filtros para filtros purificáveis: Verificação padrão para avaliação comparativa de filtros purificáveis (Instruções VDI), 2003.

ATTIVISSIMO, F.; CATALDO, A.; FABBIANO, L.; GIAQUINTO, N. Systematic errors and measurement uncertainty: An experimental approach. *Measurement*, v.44, p.1781-1789, 2011.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG). *Measurement systems analysis Reference Manual*. 4 ed. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force, 2010.

AZEVEDO, S. G. R. Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

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

BARKER, P. J.; HEERTJES, P. M.; HIBOU, J. L. The influence of the initial filtration velocity and of vibrations on the resistance of a polystyrene filtercake. *Laboratory of Chemical Engineering of the Technical University, Delft, Chemical Engineering Science*, 1959, vol. 10, pag. 139 – 149, Pergamon Press, Ltd. London.

BARROS, P. M. de. Estudo da força de adesão de tortas de filtração de gases em diferentes condições operacionais. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

BERGMAN, W. A. H.; HEBARD, H. D.; LUM, B. Y.; KUHL, W. D. Electrostatic air filters generated by electric fields. Lawrence Livermore National Laboratory. Fine Particle Society Fall Meeting, September 18 – 19, 1980, University of Maryland, College Park, Maryland, January 27, 1980.

BROWN, C.A.; SCHNELLE Jr, K. B. Air pollution control technology handbook. Boca Raton CRC Press, 1 ed. 2002.

BRT – SERVIÇO BRASILEIRO DE NORAS TÉCNICAS. Disponível em: <http://www.respostatecnica.org.br>. Acesso em julho de 2015.

BURDICK, R.K.; BORROR, C.M.; MONTGOMERY, D.C. A review of methods for measurement systems capability analysis. *Journal of Quality Technology*, v.35, p.342-354, 2003.

CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLER, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. *Powder Technology*, v.128, p.213-217, 2001.

CAMPOS, M. M.; AGUIAR, M. L. “Filtração de gases: estudo da força de adesão entre tortas de concentrado fosfático e tecidos de fibras sintéticas”. In. VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Uberlândia, MG, 2009.

CAPES, C. E.; DARCOVICH, K.; JONASSON, K. A. Developments in the control of fine particulate air emissions. *Advanced Powder Technol.* Vol. 8 nº 3, p. 179 – 215, 1997.

CERON, L. P; EINLOFT, S.; LIGABUE, R. Controle da filtração de particulados em não tecidos por perda de pressão e fluxo de ar. Revista Química Têxtil, volume 108, p. 68 – 74, 2012

CHEN, Y.; HSIAU, S. Cake formation and growth in cake filtration. Powder Technology. p. 217 – 224, 2009.

CHENG, Y.; TSAI, C. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. Aerosol Science and Technology, volume 29, p. 315 – 328, 1998.

CHEREMISINOFF, N. P. Handbook of air pollution prevention and control, cap.7, p. 404 – 417, 2002.

CHOI, J. H.; HÁ, S. J.; JANG, H. J. Compression properties of dust cake of fine fly ashes from a fluidized bed coal combustor on a ceramic filter, Powder Technology, p. 106-115, 2004.

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

CIRQUEIRA, S. S. R. Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

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

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Disponível em<<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: novembro de 2016.

CONNELL, H.; ZHU, J.; BASSI, A. Effect of particle shape on crossflow filtration flux. Journal of Membrane Science. Volume 153, p. 121-139, 1999.

COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. Air pollution control: a design approach, cap. 3, p. 115 – 117, cap. 6, p. 177 – 203, 3 ed., 2002.

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

DAVIES, C. N. Particle-Fluid Interaction. Journal of Aerosol Science, v. 10, p. 477-513, 1979.

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

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

ENDO, Y.; CHEN, D. R.; PUI, D. H. Y.; Effects of particle polydispersity and shape factor during dust cake loading on air filters. Powder Technology, v. 98, p. 241-249, 1998.

ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, v. 48, nº 2, p. 89-94, 1952.

FANE, A. G.; LI, T.; LAW, A. W. Submerged hollow fibre membrane filtration with transverse and longitudinal vibrations. Journal of Membrane Science, 455, p. 83-91, 2014.

FARGNOLI, A. G. Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

FAUSTINO, P. B. Determinação experimental da força de adesão entre partículas e meios filtrantes constituídos de celulose. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

FELICETTI, M. A. Investigação da influência do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicado a técnica centrífuga. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

GINO CACCIARI INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE FILTROS DE TECIDOS LTDA.

HAMAKER, H. C. The London-Van der Waals attraction between spherical particles. *Physica* IV, v. 10, p. 1058, 1937.

HINDS, W. C. *Aerosol Technology*. John Wiley & Sons, New York, 1982.

HINDS, W.C. *Aerosol technology: Properties, behavior and measurement of airborne particles*. Wiley Interscience, 1999.

INDA – ASSOCIATION OF NONWOVEN FABRICS INDUSTRY. Disponível em <<http://www.inda.org>. Acesso em 2015.

INNOCENTINI, M.D.; PARDO, A.; V.C. PANDOLFELLI. How accurate is darcy's law. *The American Ceramic Society Bulletin*, p. 64 – 68, 1999.

ITO, L.X. Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J. I. T.; LIU, B. Y. H. Effective pore diameter and monodisperse particle clogging fibrous filters. *Journal Aerosol Science*, vol. 28, n 1, p. 147 – 158, 1996.

KANAOKA, C.; MAO, N.; OTANY, Y.; YAO, Y. Modeling the filtration process with a flat-type fabric filter. *Original paper Advanced Powder Technol.*, vol. 17, nº 3, p 237 – 256, 2006.

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.

KOCH, D.; SCHOLZ, K.; SEVILLE, J; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. *Powder Technology*, v. 141, p. 1-11, 1996.

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

LEITH, D.; ALLEN, R. W. K. Dust filtration by fabric filters, In:Progress in Filtration and Separation, vol. 4, R.J. Walkeman, Elsevier, Amsterdam , 1986.

LICHT, W. Air pollution control engineering: basic calculations for particulate collection, cap. 8, p. 373 – 409, 2ed. 1988.

LIMA, B. A. Avaliação do desempenho dos meios filtrantes de celulose RAD+ e RAD Plus submetidos à filtração de gases a altas pressões. (Dissertação de Mestrado_ - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 2015.

LIU, B. Y. H.; RUBOW, K. L. Proc. Of the 5th world filtration congress, França, 1990.

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. Prevenção e controle de poluição nos setores energéticos, Industrial e de Transporte. 2º edição- Rio de Janeiro: Interciência. 2002.

LUCAS, R. D. de. Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de torta de filtração de gases em filtros de tecidos. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

MALVERN INSTRUMENTS LIMITED. A basic guide to particle characterization, 2012.

MATTESON, M. J. Filtration: Principles and practices. New York, Marcel Dekker Inc., 1987.

MELLO, R. L. S. de. Estudo do mecanismo eletroforético de coleta na filtração de aerossóis. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

MONTGOMERY, D.C. *Statistical Quality Control*, 5 ed. John Wiley and Sons, Inc., New York, 2005.

MOREIRA, F. L. Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros de manga. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, 1998.

NI, L. A.; YU, A. B.; LU, G. Q.; HOLMES, T. Simulation of the cake formation and growth in cake filtration. *Minerals Engineering* 19, p. 1084 – 1097, 2006

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

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – Adoção do Acordo Paris: Conferência das Partes. Convenção Quadro sobre Mudança do Clima. Traduzido pelo Centro de Informação das Nações Unidas para o Brasil (UNIC Rio), 2015.

PARK, P.K.; LEE, C.H., LEE, S. Determination of cake porosity using image analysis in a coagulation microfiltration system. *Journal of Membrane Science*. Volume 293, p. 66-72, 2007.

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

PAYET, S.; BOULAUD, D.; MADELAINE, G.; RENOUX, A. Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles. *Journal Aerosol Science*, v. 23, n. 7, p. 723 – 735, 1992.

PEREIRA, R.B.D., PERUCHI, R.S., PAIVA, A.P., COSTA, S.C., FERREIRA, J.R. Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation. *Measurement*, v. 82, p. 135-144, 2016.

PERUCHI, R. S., PAIVA, A.P., BALESTRASSI, P.P., FERREIRA, J.R., SAWHNEY, R. Weighted approach for multivariate analysis of variance in measurement system analysis. *Precision Engineering*, v. 38, n. 3, p. 651-658, 2014.

PERUCHI, R.S., JUNIOR, H.M., FERNANDES, N.J., BALESTRASSI, P.P., PAIVA, A.P. Comparisons of multivariate GR&R methods using bootstrap confidence interval. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 38, n. 4, p. 489-496, 2016.

PERRY, R. H.; GREEN, D. W. (Ed.) Perry's chemical engineers' handbook. New York: McGraw-Hill, 1999.

REMBOR, H. J., KASPER, G. Fibrous filter – measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency. III Word Congress on Particle Technology, 1996.

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

REYNOL Jr. A. S. Estudo da Lavagem da Polpa Marrom do Processo Sulfato: Mecanismos da Filtração e Balanços de Massa. 2005. 120p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ROCHA, S. M. S. Limpeza de gases em filtros manga: estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

RODRIGUES, K. B. Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

RODRIGUES, K. B. Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

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

RUMPF, H. The strength of granules and agglomerates. In: KNEPPER, W. A., Agglomeration Interscienc, New York, p. 379-414, 1962.

RUMPF, H. Particle adhesion. In: Sastry K.V. S (Ed) Agglomeration 77, American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, p. 97-129, 1977.

SANTANA, E.; CUNHA, K. B.; FERREIRA, A. L.; ZAMBONI, A. Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia. Instituto de Energia e Meio Ambiente, SP, 2012.

SANTINI, J. Filtro de mangas para o controle de emissões atmosféricas de material particulado gerados no beneficiamento de mármore e granitos. Trabalho de Conclusão de Curso, TCC, Universidade de Passo Fundo, UPF, 2011.

SCHUBERT, H. Principles of Agglomeration. International Chemical Engineering, v. 21, nº3, p. 363-371, 1981.

SEVILLE, J. P. K.; DUO, W.; KIRKBY, N. F.; BUNCHELE, H.; CHEUNG, C. K. Patchy cleaning of rigid gas filters. Chemical Engineering Science, v. 52, nº 1, p. 153 – 164, 1997.

SEVILLE, J. P. K.; CHEUNG, W.; CLIFT, R.A. Patchy cleaning interpretation of dust cake release from non-woven fabrics. Filtration and Separation, vol. 26, p. 187-190, 1989.

SILVA, G. M. C. Desempenho de filtros cerâmicos na filtração de gases a altas temperaturas. Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

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

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

SPURNEY, K. R. Advances in aerosol filtration. Editora Lewis Publishers, 1998.

TANABE, E. H. Estudo do comportamento da deposição das partículas em diferentes meios filtrantes. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2008.

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

TANABE, E. H. Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões. (Tese de Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

THEODORE, L. Air pollution control equipment calculations, cap.12, p. 503 – 513 2008.

THEODORE, L.; BUONICORE, A. J. Air pollution control equipment- particulates, vol. 01, CRC Press, Flórida, 1988.

TIENI, E. F. Filtração de gases: Estudo do fenômeno da limpeza por blocos (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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

UNEP - *United Nations Environment Programme. Actions on Air Quality, - Policies & Programmes for Improving Air Quality Around the World.* Disponível em <http://www.unep.org/transport/airquality/>. Acesso em novembro de 2016.

WAKEMAN, R. J.; WU, P. Low-frequency vibration effects on coarse particle filtration. KONA, nº 20, 2002.

WALSH, D. C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. Filtration and Separation, June 1996, p. 501 – 506. Disponível em: www.sciencedirect.com. Acesso em: outubro, 2010.

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

WHITE, T.K.; BORROR, C.M. Two-dimensional Guidelines for Measurement System Indices. *Quality and Reliability Engineering International*, v.27, p.479-487, 2011.

WOODALL, W.H.; BORROR, C.M. Some relationships between gage R&R criteria. *Quality and Reliability Engineering International*, v.24, p.99-106, 2008.

ZEN'KOVSKAYA, S. M. Effect of high-frequency vibration on filtration convection. Plenum Publishing Corporation, pag. 83 – 88, 1993.

APÊNDICE A

O Apêndice A apresenta as Tabelas A.1 a A.5 para os parâmetros dos ajustes das curvas de filtração em função da queda de pressão com a massa de pó acumulada por unidade de área.

As Tabelas A apresentam os ajustes da queda de pressão em função da massa de pó acumulada por unidade de área para a faixa de frequências.

Tabela A.1: Ajuste dos testes com rocha fosfática moída para a faixa baixa.

Frequência (Hz)	0	5	6	7
Equação do ajuste	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y=a+bx^{1,5}+cx^3$	$y=a+bx^2+cx^4$	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$
r^2	0,998	0,997	0,996	0,997
a	-6,332	-94,7358	322,9189	169,0831
b	126177,1	40128,51	64293,53	104655
c	-116867	-18889,9	-88842	-89766,9

Tabela A.2: Ajuste dos testes com rocha fosfática moída para a faixa intermediária.

t	0	12	13	14
Equação do ajuste	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y=a+bx^{1,5}+cx^3$	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y=a+bx^2+cx^3$
r^2	0,998	0,998	0,999	0,999
a	-6,332	54,56767	124,3259	161,7689
b	126177,1	24514,34	126243,9	91672,08
c	-116867	6578,229	-124454	-94139,4

Tabela A.3: Ajuste dos testes com rocha fosfática moída para a faixa alta.

Frequência (Hz)	0	17	18	19
Equação do ajuste	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y=a+bx^2+cx^3$
r^2	0,998	0,998	0,998	0,998
a	-6,332	34,24715	78,02445	227,5461
b	126177,1	115051,8	131337,6	84928,11
	-116867	-106587	-117189	-91349,6

Tabela A.4: Ajuste dos testes com polvilho para o sistema estático e com vibrações independentes e intermitentes.

Frequência (Hz)	0	12	17	12 intermitente	17 intermitente
Equação do ajuste	$y=a+bx^{2,5}+cx^3$	$y=a+bx^2+cx^{2,5}$	$y^{-1}=a+b/x+c/x^2$	$y^{-1}=a+b/x+c/x^2$	$y^{-1}=a+bx^3+c/x^2$
r^2	0,995	0,992	0,996	0,997	0,992
a	-131,06458	-206,438	0,000113	0,00018	8,32E-05
b	2745,8336	3530,995	-0,00022	-0,00059	6,13E-08
	-1231,1768	-1485,81	0,000651	0,001191	0,00032

Tabela A.5: Ajuste dos testes com talco puro para o sistema estático e com vibrações independentes e intermitentes.

Frequência (Hz)	0	12	17	12 intermitente	17 intermitente
Equação do ajuste	$y=a+bx^{1,5}+cx^{2,5}$	$y^{-1}=a+b/x^{1,5}$	$y^{-1}=a+bx+c/x^2$	$Y^{0,5}=a+bx+cx^2$	$y^{-1}=a+bx+c/x^2$
r^2	0,997	0,991	0,996	0,993	0,996
a	-186,034	5,62E-05	1,57E-04	1,05E+01	1,57E-04
b	2814,96	0,000297	-2,54E-05	43,13883	-2,54E-05
	-379,815	-	0,000234	-5,30974	0,000234