



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



**EFEITO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA PERPENDICULAR NA
FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TORTAS DE FILTRAÇÃO DE
AEROSSÓIS**

Uberlândia – MG

2014



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



EFEITO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA PERPENDICULAR NA FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TORTAS DE FILTRAÇÃO DE AEROSSÓIS

ALINE MARQUES MORAES AROUCA

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

Uberlândia – MG

2014

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

A771e
2014 Arouca, Aline Marques Moraes, 1982-
 Efeito da vibração mecânica perpendicular na formação e remoção
de tortas de filtração de aerossóis / Aline Marques Moraes Arouca. -
2014.
 177 f. : il.

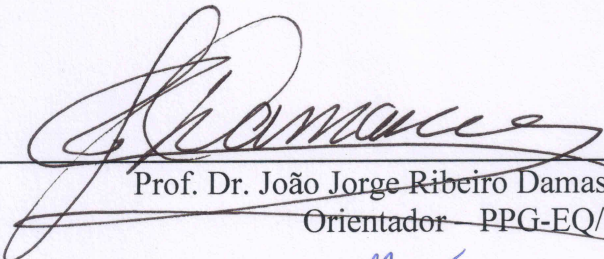
 Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
 Coorientador: Luiz Gustavo Martins Vieira.
 Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.
 Inclui bibliografia.

 1. Engenharia Química - Teses. 2. Filtros e filtração - Teses. 3.
Vibração - Medição - Teses. 4. - Teses. I. Damasceno, João Jorge
Ribeiro. II. Vieira, Luiz Gustavo Martins, 1976- III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. IV. Título.

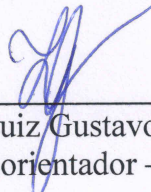
CDU: 66.0

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO
DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA EM 26/08/2014.

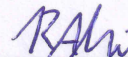
BANCA EXAMINADORA:



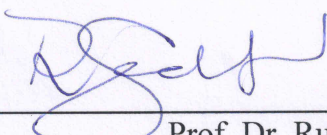
Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador – PPG-EQ/UFU



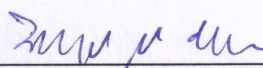
Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
Coorientador – PPG-EQ/UFU



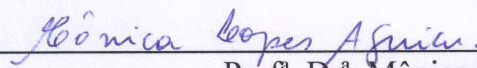
Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni
PPG-EQ/UFU



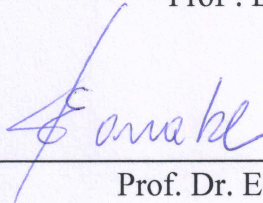
Prof. Dr. Rubens Gedraite
FEQUI/UFU



Prof. Dr. Francisco José de Souza
FEMEC/UFU



Profª. Drª. Mônica Lopes Aguiar
DEQ/UFSCar



Prof. Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe
DEQ/UFMS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela oportunidade de prosseguir com os estudos. O agradeço pela vida, saúde, motivação, amor, cuidado, força, companhia e toda orientação que recebi como dádiva dEle por todo esse período.

Agradeço ao meu esposo, Fábio Arouca, por todo amor, incentivo, apoio, compreensão, cuidado e pelas orações. Obrigada por estar sempre pronto a ajudar em momentos de necessidade, esclarecendo minhas dúvidas técnicas e providenciando alunos de iniciação científica que me auxiliassem nos ensaios.

Agradeço aos meus pais, Elias Moraes e Liliana, pelo amor, incentivo e pelas orações a Deus, pedindo-O que abençoasse os meus estudos. Agradeço ao apoio dos meus irmãos, Thaís, David e Daniel, que sempre compreenderam minha ausência em determinadas ocasiões, orando para que Deus proporcionasse o bom desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ao apoio e incentivo dos meus sogros, Edson Arouca e M^a. Valéria, que sempre torceram por mim. Também agradeço às minhas cunhadas, Léa e Danielle, aos primos Everton e Valéria, e aos amigos Fredson e Luciana, que, juntamente com minha família, participaram desses quatro anos com suas orações.

Agradeço ao meu orientador, prof. João Jorge Ribeiro Damasceno, que sempre esteve pronto para me auxiliar quando sua ajuda era solicitada. Obrigada pelos ensinamentos, pelas dicas, por providenciar os recursos necessários para a execução do trabalho e pela oportunidade de trabalharmos juntos.

Agradeço ao meu coorientador, prof. Luiz Gustavo Martins Vieira, pelas revisões dos trabalhos realizados nesse período, pela disposição em auxiliar nas discussões do tema, pela correção minuciosa do texto e conceitos deste trabalho e pela amizade.

Agradeço aos alunos de iniciação científica: Gustavo Gerkman, por sua responsabilidade, dedicação e interesse nesses quase três anos em que trabalhamos juntos; Carolina Menezes pelo compromisso, dedicação e responsabilidade demonstrados nesses quase dois anos de trabalho no laboratório; Allan Effgen, Lucas Camargos, João Mauro Lima, Igor Rezende e Camilla Leão, pelo apoio e responsabilidade no desempenho das tarefas que foram propostas neste último ano. Obrigada, pessoal, pelo tempo que trabalhamos juntos, pela

dedicação na realização das atividades no laboratório e pela boa companhia durante esse tempo.

Agradeço aos alunos de iniciação científica: Felipe Castro, Felipe Alvarez, Thiago Cordeiro, Yorranna Peixoto, Bruna Rondi e Amauri Cassiano pela disposição em ajudar nos testes iniciais deste trabalho.

Agradeço aos professores que compõem a banca de avaliação deste trabalho: Eduardo Tanabe, Francisco de Souza, Mônica Aguiar, Ricardo Malagoni e Rubens Gedraite por aceitarem o convite, me proporcionando a oportunidade de aprender com suas experiências e conhecimentos.

Agradeço aos colegas pós-graduandos do LabSep: Bruno Arantes, Deivid Nunes, Maurielem Dalcin, Hélio Jr., Adriana Quemelli, Eduarda Matos e Flávia Fagundes pela disposição em auxiliar nos ensaios, quando era necessário, pelas discussões produtivas em relação aos trabalhos desenvolvidos e pela boa companhia no ambiente de trabalho. Agradeço ao pessoal da UPSP (Unidade de Pesquisa da Engenharia Química – Segismundo Pereira), tanto aos alunos de outros grupos de pesquisa quanto aos funcionários (Ana Cláudia, Wesley e D. Olésia), pelo bom convívio e boa vontade em me auxiliar quando eram solicitados.

Agradeço ao pessoal da oficina da FEQUI, Ulisses e Humberto Belo, pela prontidão em solucionar os problemas que surgiam no decorrer dos ensaios.

Agradeço aos colegas que me auxiliaram nas atividades que desenvolvi no Laboratório de Caracterização de Partículas: Ricardo Corrêa Santana, Danylo de Oliveira Silva e Bruno Arantes Moreira. Agradeço à Francielle pelo auxílio na obtenção de boas imagens através do uso do MEV, no Laboratório Multiusuário de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química – UFU.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e à secretaria da Pós-Graduação, pelo profissionalismo em nossa relação.

Agradeço à CAPES pelo investimento para que a realização deste trabalho fosse possível.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Quem nos separará do amor de Cristo? A tribulação, ou a angústia, ou a perseguição, ou a fome, ou a nudez, ou o perigo, ou a espada? Porque estou certo de que, nem a morte, nem a vida, nem os anjos, nem os principados, nem as potestades, nem o presente, nem o porvir, nem a altura, nem a profundidade, nem alguma outra criatura nos poderá separar do amor de Deus, que está em Cristo Jesus nosso Senhor.”

(Rm 8.35,38,39)

Sumário

Lista de Tabelas	i
Lista de Figuras	iii
Nomenclatura	ix
Resumo	xii
Abstract	xiii

1 – INTRODUÇÃO.....1

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.5

2.1 Poluição Atmosférica.....	5
2.2 Rocha Fosfática.....	9
2.3 Limpeza de gases.....	10
2.4 Filtração Gás-Sólido.....	11
2.4.1 Meio Filtrante.....	12
2.4.2 Tortas de Filtração.....	13
2.4.3 Mecanismos de Limpeza.....	15
2.4.4 Porosidade da torta de filtração.....	17
2.4.5 Queda de Pressão.....	20
2.4.5.1 Queda de pressão residual.....	21
2.4.6 Curva de Filtração.....	25
2.4.7 Mecanismos de Coleta	29
2.4.7.1 Difusão Browniana.....	30
2.4.7.2 Impactação Inercial.....	31
2.4.7.3 Gravidade.....	31

2.4.7.4 Intercepção Direta.....	31
2.4.7.5 Mecanismo Eletroforético.....	32
2.4.7.6 Eficiência Total de Coleta.....	33
2.5 Força de Adesão.....	34
2.5.1 Metodologia de Seville <i>et al.</i> (1989).....	37
2.5.2 Remoção da torta por vibração mecânica.....	39
2.6 Adimensional de Euler.....	40
2.7 Revisão da Literatura.....	40
2.7.1 Ciência da Filtração.....	41
2.7.2 Tecnologia da Filtração.....	43
2.7.3 Modelagem e Simulação Aplicadas ao Sistema de Filtração.....	44
3 – MATERIAL E METODOLOGIA.....	47
3.1 Aparato experimental.....	47
3.2 Material Particulado.....	52
3.3 Meio filtrante.....	59
3.4 Metodologia.....	62
3.4.1 Filtração gás-sólido: procedimento geral.....	62
3.4.2 Etapa 1: Testes Preliminares.....	65
3.4.3 Etapa 2: 3 Faixas de Frequência de Vibração.....	67
3.4.4 Etapa 3: Curvas de Filtração.....	68
3.4.5 Etapa 4: Força de Adesão.....	69
3.4.6 Etapa 5: Ciclos de Filtração.....	71
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.1 Testes preliminares.....	72
4.2 Avaliação de três faixas de frequências.....	77

4.2.1 Filtro de polipropileno (0, 7, 13 e 19 Hz).....	88
4.3 Curvas de filtração: rocha moída, rocha virgem e polvilho.....	92
4.3.1 Rocha Moída.....	92
4.3.1.1 Teste Híbrido.....	100
4.3.2 Rocha Virgem.....	102
4.3.3 Polvilho Doce.....	106
4.3.4 Comparação entre RM, RV e POLVILHO.....	112
A. Comparação entre rocha moída e rocha virgem.....	114
B. Comparação entre rocha fosfática e polvilho doce.....	116
4.4 Força de adesão: rocha moída, rocha virgem e polvilho.....	117
4.4.1 Rocha moída.....	117
4.4.2 Rocha virgem.....	121
4.4.3 Polvilho doce.....	124
4.4.4 Comparação entre rocha fosfática e polvilho doce.....	127
4.4.5 Teste com aterramento.....	127
4.4.6 Outras teorias.....	133
4.5 Ciclos de filtração.....	135
4.6 Análise energética do processo: número de Euler.....	151
4.7 Análise geral da vibração nos sistemas testados.....	155
5 – CONCLUSÃO E SUGESTÕES.....	161
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	164
APÊNDICE A.....	173
ANEXO A.....	176

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Fonte: Resolução Conama 03/90).....	2
TABELA 2.1 – Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas (SANTOS, 2001).....	7
TABELA 2.2 – Convenções adotadas pela ACGIH (<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i> , 1993), ISO (<i>International Standards Organization</i>) e CEN (<i>Comité Européen de Normalisation</i>) para porcentagens em massa de poeira inalável, torácica e respirável (SANTOS, 2001).....	8
TABELA 2.3 – Equipamentos e Mecanismos Industriais de Limpeza de Gases (HOLDICH, 2002).....	10
TABELA 2.4 – Estudos do destacamento da torta de filtração (KOCH <i>et al.</i> , 1996).....	16
TABELA 2.5 – Valores de distância efetiva (a) entre partícula e substrato, calculados pela Equação (2.30) (FAUSTINO, 2010).....	35
TABELA 3.1 – Valores do diâmetro característico e da densidade dos materiais.....	56
TABELA 3.2 – Caracterização dos materiais particulados.....	57
TABELA 3.3 – Especificações dos meios filtrantes (<i>GINO CACCIARI TÊXTEIS TÉCNICOS Ltda</i>).....	59
TABELA 3.4 – Valores de velocidades utilizados neste trabalho.....	64
TABELA 3.5 – Amplitude das frequências selecionadas para os testes preliminares.....	67
TABELA 4.1 – Teste de Hipótese para a massa das tortas de filtração.....	96
TABELA 4.2 – Ponto de Colmatação para o teste híbrido e para os testes independentes.....	101
TABELA 4.3 – Ponto de colmatação para as tortas dos diferentes materiais, nas frequências de 0 Hz e 7 Hz.....	114
TABELA 4.4 – Força de adesão para os testes com rocha moída.....	120
TABELA 4.5 – Força de adesão para os testes com rocha virgem.....	124

TABELA 4.6 – Força de adesão para os testes com polvilho doce.....	127
TABELA 4.7 – Força de adesão para os testes com aterramento.....	130
TABELA 4.8 – Cálculo da força de adesão por Seville, Rumpf e Kendall.....	134
TABELA 4.9 – Análise geral dos sistemas testados.....	160
TABELA A.1 – Ajuste dos testes preliminares (gráfico da Figura 4.5).....	174
TABELA A.2 – Ajuste dos testes da Seção 4.2, para o filtro de Poliéster.....	174
TABELA A.3 – Ajuste dos testes da Seção 4.2.1, para o filtro de Polipropileno.....	174
TABELA A.4 – Ajuste dos testes da Seção 4.3.....	175
TABELA A.5 – Ajuste do teste híbrido, apresentado na Seção 4.3.1.1.....	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Crescimento Populacional (Fonte: FUNDO DE POPULAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS).....	1
Figura 2.1 – Emissões Estimadas de Material Particulado (MP). FONTE: PRONCOVE (2011).....	6
Figura 2.2 – Consumo de rocha fosfática no Brasil em 2005 (KULAIF, 2009).....	9
Figura 2.3 – Esquema da formação da torta (Fonte: Acervo pessoal).....	11
Figura 2.4 – Diferença entre a estrutura dos tecidos de fibra sintética (a) e fibra natural (b) (CERON <i>et al.</i> , 2010).....	12
Figura 2.5 – Determinação do ponto de colmatação (WALSH, 1996).....	15
Figura 2.6 – Esquema do condicionamento do filtro (INNOCENTINI, 1997).....	23
Figura 2.7 – Comportamentos possíveis para a curva de condicionamento do filtro (INNOCENTINI, 1997).....	23
Figura 2.8 – (a) Superfície do meio filtrante com a torta de filtração e (b) fenômeno <i>Patchy Cleaning</i> (TANABE <i>et al.</i> , 2008).....	24
Figura 2.9 – Exemplos de curvas características para filtros de ar (SVAROVISKY, 1981).....	25
Figura 2.10 – Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração (TANABE, 2008).....	26
Figura 2.11 – Ciclos de filtração ideais (NORMA VDI 3928, 2003).....	26
Figura 2.12 – Ciclos de filtração reais (NORMA VDI 3926).....	27
Figura 2.13 – Influência da limpeza por blocos (“ <i>Patchy Cleaning</i> ”) nos ciclos de filtração reais (NORMA VDI 3926).....	28
Figura 2.14 – Redução da espessura da torta pelo efeito da compressão (FARGNOLI, 2010).....	29
Figura 2.15 – Mecanismos de Coleta (YANG, 2012).....	29
Figura 2.16 – Contribuição dos mecanismos de coleta na eficiência total de coleta (HINDS, 1999 <i>apud</i> YANG, 2012).....	33
Figura 2.17 – Demonstração da primeira e segunda etapa propostas por Seville <i>et al.</i> (1989).	38
Figura 2.18 – Demonstração da terceira etapa proposta por Seville <i>et al.</i> (1989), para o cálculo da força de adesão (BARROS, 2010).....	38
Figura 3.1 – Aparato experimental.....	48

Figura 3.2 – Detalhes da câmara de alimentação.....	49
Figura 3.3 – Fotografia da câmara de filtração, com detalhe do acoplamento das duas partes cilíndricas da câmara de filtração.....	50
Figura 3.4 – Esquema da câmara de filtração, mesa de suporte, motor excêntrico e inversor de frequência.....	50
Figura 3.5 – Detalhes: pé da mesa suporte (a); contato da haste do eixo central com o apoio da câmara de filtração (b); inversor de frequência do motor (c); vista do contato do eixo excêntrico do motor com a haste que recebe a propulsão do movimento do motor (d).....	51
Figura 3.6 – Destaque do comando de válvulas e soprador.....	52
Figura 3.7 – Partículas de rocha fosfática (a) e polvilho doce (b) em imagens do MEV.....	53
Figura 3.8 – Distribuição granulométrica da Rocha Fosfática Virgem e da Rocha Fosfática Moída, na alimentação dos ensaios.....	54
Figura 3.9 – Distribuição granulométrica média da Rocha Fosfática Virgem e da Rocha Fosfática Moída, nas tortas de filtração.....	54
Figura 3.10 – Distribuição granulométrica das partículas de polvilho doce.....	55
Figura 3.11 – Exemplos de esferas equivalentes (<i>MALVERN INSTRUMENTS LIMITED</i> , 2012).....	56
Figura 3.12 – Ilustração do D[4,3] e do D[3,2] de uma distribuição de tamanho de partículas na qual há uma significativa proporção de partículas finas (<i>MALVERN INSTRUMENTS LIMITED</i> , 2012).....	57
Figura 3.13 – Vazão de alimentação de cada material ao sistema de filtração.....	58
Figura 3.14 – Estrutura superficial dos meios filtrantes: (a) polipropileno, (b) poliéster.....	60
Figura 3.15 – Estrutura interna das fibras dos meios filtrantes: (a) polipropileno, (b) poliéster.....	61
Figura 3.16 – Detalhes do fechamento do filtro: 1) parafusos que unem as duas partes cilíndricas da câmara de filtração; 2) haste de metal flexível para imobilização da câmara de filtração durante os processos com vibração mecânica.....	63
Figura 3.17 – Detalhe da haste central e das barras que promovem o movimento oscilatório na direção vertical.....	66
Figura 3.18 – Detalhe do local onde foi fixado o indicador gráfico, no apoio da câmara de filtração.....	66
Figura 4.1 – Tempo de filtração para cada frequência de vibração ($\Delta P_{\max}=4903$ Pa).....	73

Figura 4.2 – Massa acumulada por unidade de área para cada frequência de vibração.....	74
Figura 4.3 – Porosidade da torta formada sob a influência de diferentes frequências de vibração.....	75
Figura 4.4 – Amplitude do movimento oscilatório para cada frequência de vibração.....	75
Figura 4.5 – Ajuste das frequências em relação ao tempo de filtração.....	76
Figura 4.6 – Ajuste para a curva de filtração (f: 0 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	77
Figura 4.7 – Ajuste para a curva de filtração (f: 5 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	78
Figura 4.8 – Ajuste para a curva de filtração (f: 6 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	79
Figura 4.9 – Ajuste para a curva de filtração (f: 7 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	79
Figura 4.10 – Ponto de colmatação indicado na curva de filtração (f: 5, 6 e 7 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	80
Figura 4.11 – Ajuste da curva de filtração (f: 12 Hz); $\Delta P = 4903$ Pa.....	81
Figura 4.12 – Ajuste da curva de filtração (f: 13 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	82
Figura 4.13 – Ajuste da curva de filtração (f: 14 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	82
Figura 4.14 – Ponto de colmatação indicado na curva de filtração (f: 12, 13 e 14 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	83
Figura 4.15 – Ajuste da curva de filtração (f: 18 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	84
Figura 4.16 – Ajuste da curva de filtração (f: 19 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	84
Figura 4.17 – Ajuste da curva de filtração (f: 20 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	85
Figura 4.18 – Ponto de colmatação indicado na curva de filtração (f: 18, 19 e 20 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.....	86
Figura 4.19 – Espessura da torta em relação à queda de pressão (f: 0, 7, 13 e 19 Hz); filtro PE.....	87
Figura 4.20 – Ajuste para a curva de filtração (f: 0 Hz); filtro de PP.....	88
Figura 4.21 – Ajuste para a curva de filtração (f: 7 Hz); filtro de PP.....	89
Figura 4.22 – Ajuste para a curva de filtração (f: 13 Hz); filtro de PP.....	90
Figura 4.23 – Ajuste para a curva de filtração (f: 19 Hz); filtro de PP.....	90
Figura 4.24 – Espessura das tortas em polipropileno (PP) e poliéster (PE).....	91
Figura 4.25 – Curva de filtração (f: 0 Hz); $\Delta P_{\max}=9806$ Pa.....	93
Figura 4.26 – Curva de filtração (f: 7 Hz); $\Delta P_{\max}=9806$ Pa.....	94

Figura 4.27 – Curva de filtração (f: 13 Hz); $\Delta P_{\max}=9806$ Pa.....	95
Figura 4.28 – Comparação entre as curvas de filtração dos testes (f: 0, 7 e 13 Hz).....	95
Figura 4.29 – Carga mássica por arraste (f: 0, 7, 13 Hz).....	97
Figura 4.30 – Relação entre a resistência específica da torta e a carga mássica (f: 0, 7 e 13 Hz).....	98
Figura 4.31 – Porosidade e espessura das tortas de filtração em relação à carga mássica de pó (f: 0, 7 e 13 Hz).....	99
Figura 4.32 – Curva de filtração para o teste híbrido.....	100
Figura 4.33 – Comparação entre o teste híbrido e os testes independentes.....	101
Figura 4.34 – Curva de filtração (f: 0 Hz); rocha virgem.....	102
Figura 4.35 – Curva de filtração (f: 7 Hz); rocha virgem.....	103
Figura 4.36 – Carga mássica por arraste (f: 0 e 7Hz); rocha virgem.....	104
Figura 4.37 – Relação entre a resistência específica da torta e a carga mássica (f: 0 e 7 Hz); rocha virgem.....	105
Figura 4.38 – Porosidade e espessura das tortas de filtração em relação à carga mássica de pó (f: 0 e 7 Hz); rocha virgem.....	106
Figura 4.39 – Curva de filtração (f: 0 Hz); polvilho doce.....	107
Figura 4.40 – Curva de filtração (f: 7 Hz); polvilho doce.....	108
Figura – 4.41 - Carga mássica por arraste (f: 0 e 7Hz); polvilho doce.....	109
Figura 4.42 – Relação entre a resistência específica da torta e a carga mássica (f: 0 e 7 Hz); polvilho doce.....	109
Figura 4.43 – Porosidade e espessura das tortas de filtração em relação à carga mássica de pó (f: 0 e 7 Hz); polvilho doce.....	110
Figura 4.44 – Comparação entre a porosidade das tortas calculadas pela Eq. de Ergun e pela Eq. de Endo (f: 0 e 7 Hz); polvilho doce.....	112
Figura 4.45 – Comparação entre as curvas de filtração para rocha moída, rocha virgem e polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).....	113
Figura 4.46 – Comparação das porosidades das tortas para rocha moída, rocha virgem e polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).....	113
Figura 4.47 – Comparação do arraste do filtro (S) para a filtração da rocha moída, da rocha virgem e do polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).....	114
Figura 4.48 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); rocha moída.....	118

Figura 4.49 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha moída.....	119
Figura 4.50 – Velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha moída.....	120
Figura 4.51 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); rocha virgem.....	122
Figura 4.52 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha virgem.....	122
Figura 4.53 – Velocidade de limpeza (V_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha virgem.....	123
Figura 4.54 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); polvilho doce.....	125
Figura 4.55 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); polvilho doce.....	126
Figura 4.56 – Velocidade de limpeza (V_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); polvilho doce.....	126
Figura 4.57 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); aterramento.....	128
Figura 4.58 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); aterramento.....	129
Figura 4.59 – Velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); aterramento.....	130
Figura 4.60 – Porosidade da torta nos sistemas com aterramento e sem aterramento (f: 7 Hz).....	131
Figura 4.61 – Porosidade da torta nos sistemas com aterramento e sem aterramento (f: 13 Hz).....	132
Figura 4.62 – Força que atua sobre o elemento de torta para os materiais particulados estudados, conforme teoria de Leith e Allen (1986).....	133
Figura 4.63 – Curvas de filtração para os 10 ciclos no sistema estático.....	136
Figura 4.64 – Curvas de filtração para os 10 ciclos no sistema com vibração de 7 Hz.....	137
Figura 4.65 – Comparação dos 10 ciclos de filtração entre o sistema estático e o sistema com vibração.....	138
Figura 4.66 – Comparação para o primeiro ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	139
Figura 4.67 – Comparação para o segundo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	140

Figura 4.68 – Comparação para o terceiro ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	140
Figura 4.69 – Comparação para o quarto ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	141
Figura 4.70 – Comparação para o quinto ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	142
Figura 4.71 – Comparação para o sexto ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	143
Figura 4.72 – Comparação para o sétimo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	143
Figura 4.73 – Comparação para o oitavo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	144
Figura 4.74 – Comparação para o nono ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	145
Figura 4.75 – Comparação para o décimo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	145
Figura 4.76 – Massa acumulada (W), massa desprendida (W_D) e massa retida (W_R) por unidade de área, para os 10 ciclos de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	147
Figura 4.77 – Massa acumulada por unidade de área para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	147
Figura 4.78 – Massa desprendida por unidade de área para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	148
Figura 4.79 – Massa retida por unidade de área para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	149
Figura 4.80 – Queda de pressão residual, para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).....	150
Figura 4.81 – Número de Euler (Eu) por massa acumulada por unidade de área (W); rocha moída.....	151
Figura 4.82 – Número de Euler (Eu) por massa acumulada por unidade de área (W); rocha virgem.....	152
Figura 4.83 – Número de Euler (Eu) por massa acumulada por unidade de área (W); polvilho doce.....	153
Figura 4.84 – Comparação do Número de Euler na filtração da rocha moída, rocha virgem e polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).....	154
Figura 4.85 – Relação entre a estrutura da torta de filtração e o Número de Euler para: rocha moída, rocha virgem e polvilho doce.....	154
Figura A.1 – Carta psicrométrica.....	177

NOMENCLATURA

- a – distância de separação efetiva entre duas superfícies [L]
 a^* – aceleração do motovibrador [LT^{-2}]
 a_c – fração da superfície de filtração que é limpa [-]
 A – área de filtração [L^2]
 C – fator de escorregamento de *Cunningham* [-]
 C_v – fator de escorregamento de *Cunningham* para a partícula de diâmetro d_v [-]
 C_{St} – fator de escorregamento de *Cunningham* para a partícula de diâmetro d_{St} [-]
 d – amplitude [L]
 d_f – diâmetro da fibra [L]
 d_g – diâmetro médio geométrico [L]
 d_p – diâmetro da partícula [L]
 d_{St} – diâmetro de Stokes [L]
 d_v – diâmetro de uma esfera equivalente [L]
 D – coeficiente de difusividade [L^2T^{-1}]
 D_{VS} – diâmetro médio de Sauter [L]
 $D(3,2)$ – diâmetro médio de Sauter [L]
 $D(4,3)$ – diâmetro médio volumétrico [L]
 Eu – número de Euler [-]
 f – frequência de vibração [Hz]
 F – força que atua nos pontos de contato entre as partículas [MLT^{-2}]
 F_c – força de adesão entre as partículas [MLT^{-2}]
 F_v – força que atua sobre o elemento de torta [MLT^{-2}]
 F_W – força de *Van der Waals* [MLT^{-2}]
 g – aceleração da gravidade [LT^{-2}]
 Ga – número de Galileu [-]
 H – constante de *Hamaker* [ML^2T^{-2}]
 k – fator de forma dinâmico [-]
 k_{Darcy} – permeabilidade darciana [L^2]
 k_1 – resistência específica do tecido [$ML^{-2}T^{-1}$]
 k_2 – resistência específica da torta de filtração [T^{-1}]
 K – constante empírica da Eq. de *Kozeny-Carman* [-]
 K_B – constante de *Boltzmann* [$ML^2T^{-2}\theta^{-1}$]

K_M – parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem [-]
 Ku – coeficiente hidrodinâmico de *Kuwabara* [-]
 L – espessura [L]
 M – massa de partículas [M]
 n – número médio de contatos partícula-partícula por unidade de área [-]
 p – probabilidade do erro [-]
 Pe – número de *Peclet* [-]
 q – carga da partícula [C]
 Q – vazão mássica por unidade de tempo [MT⁻¹]
 S – arraste do filtro [ML⁻²T⁻¹]
 St – número de *Stokes* [-]
 t – tempo [T]
 T – temperatura absoluta [θ]
 u_c – velocidade média do fluido [LT⁻¹]
 v_c – velocidade de limpeza [LT⁻¹]
 v_f – velocidade de filtração [LT⁻¹]
 W – massa de pó acumulada por unidade de área [ML⁻²]
 W_D – massa de pó desprendida por unidade de área [ML⁻²]
 W_R – massa de pó retida por unidade de área [ML⁻²]
 X – fração volumétrica [%]
 Y – fração mássica cumulativa [-]

Letras Gregas

α – nível de significância [-]
 ΔP – queda de pressão total [ML⁻¹T⁻²]
 ΔP_c – queda de pressão na torta [ML⁻¹T⁻²]
 ΔP_{cL} – queda de pressão na torta na limpeza [ML⁻¹T⁻²]
 ΔP_L – queda de pressão na limpeza [ML⁻¹T⁻²]
 ΔP_m – queda de pressão no meio filtrante [ML⁻¹T⁻²]
 ε – porosidade [-]
 ε_0 – permissividade do vácuo [C²T²M⁻¹L⁻³]
 ε_f – constante dielétrica do fluido [-]
 γ – fração de massa retida na torta [-]
 γ_c – coeficiente de polarização do coletor [-]

- η_d – eficiência de coleta do mecanismo browniano [-]
- η_e – eficiência de coleta eletrostática [-]
- η_g – eficiência de coleta pelo mecanismo gravitacional [-]
- η_i – eficiência de coleta por impactação inercial [-]
- η_{id} – eficiência de coleta por interceptação direta [-]
- η_t – eficiência total de coleta [-]
- μ – viscosidade do gás [ML⁻¹T⁻¹]
- ρ_g – densidade do gás [ML⁻³]
- ρ_p – densidade da partícula [ML⁻³]
- σ_g – desvio padrão do diâmetro médio geométrico das partículas [-]
- σ_R – tensão de remoção da torta de filtração [ML⁻¹T⁻²]
- σ^* – tensão normal aplicada a um aglomerado de partículas [ML⁻¹T⁻²]
- σ_{R-K}^* – tensão de ruptura do modelo de *Kendall* [ML⁻¹T⁻²]
- σ_{R-R}^* – tensão de ruptura do modelo de *Rumpf* [ML⁻¹T⁻²]

RESUMO

A atual e crescente demanda por produtos provoca uma intensificação nas atividades cabíveis ao setor industrial. Consequentemente, aumenta-se a quantidade de rejeito produzido. Este, por sua vez, deve ser descartado de maneira a não poluir o meio ambiente. Mais especificamente nas indústrias que trabalham com material particulado, observa-se, dentre outras preocupações, a de não se descartar material sólido no ar, visando minimizar os impactos causados ao meio ambiente. Com o intuito de tornar mais eficientes as operações de filtração gás-sólido, estudos em filtros de manga, confeccionados de material sintético, são realizados utilizando-se uma gama variada de materiais particulados e meios filtrantes. Além do aumento da eficiência de filtração, tais estudos objetivam simplificar ainda mais esse processo, tornando-o mais econômico. O objetivo do presente estudo é avaliar a influência da frequência de vibração na formação da torta de filtração. Para tanto, utilizou-se meios filtrantes sintéticos de poliéster e polipropileno, para separar partículas de rocha fosfática e polvilho doce de corrente gasosa com 10 cm/s de velocidade de escoamento. Foram realizados testes para avaliar o comportamento do sistema submetido à vibração em carregamentos de partículas de diferentes faixas granulométricas, além de analisar-se a resposta de processos com partículas de diferentes formatos. A vibração contínua durante o processo de filtração ocorria devido a propulsão de um motor excêntrico, o qual provocava um movimento oscilatório, na direção vertical, do filtro. Diferentes faixas de frequências de vibração foram avaliadas. O tratamento dos registros experimentais foi feito mediante o uso de correlações bem estabelecidas na literatura (Ergun, 1952 e Endo, 1998). A influência de diferentes frequências de vibração foi avaliada por meio do estudo dos parâmetros estruturais da torta de filtração. Realizou-se, também, o cálculo do número de Euler, para conhecimento dos gastos energéticos do sistema proposto. Constatou-se que a frequência de vibração mecânica, concomitante ao processo de filtração, influenciou a estrutura de formação da torta de filtração. No sistema proposto, a vibração contribuiu para a formação de tortas menos porosas e menos espessas, para todos os materiais pulverulentos testados, aumentando os gastos energéticos do processo. No entanto, a força de adesão por unidade de área foi menor, nos sistemas de filtração das partículas menores, nos processos submetidos à vibração mecânica.

Palavras-chave: limpeza de gases, filtração gás-sólido, filtros sintéticos, material particulado, frequência de vibração.

ABSTRACT

The current and growing demand for products causes an intensification of activities applicable to the industrial sector. Consequently, increases the amount of tailings produced. This, in turn, must be discarded in a manner as not to pollute the environment. More specifically in industries working with particulate matter is observed, among other concerns, not to discard the solid material in the air, aiming to minimize the impacts to the environment. In order to render operation of gas-solid filtration more efficient, studies in bag house filters, manufactured of synthetic material are performed using a wide range of particulate materials and filter media. In addition to increased filtration efficiency, these studies aim to further simplify this process, making it cheaper. The objective of this study is to evaluate the influence of vibration frequency on formation of filtration cake. For this, we used synthetic filter media made of polyester and polypropylene, to separate particles of phosphate rock and manioc starch of gas stream with flow velocity of 10 cm/s. Tests to evaluate the behavior of the system subjected to vibration loads of particles of different particle sizes were performed, in addition to analyzing the response of processes with particles of different shapes. The continuous vibration during the filtration process had occurred due to an eccentric propelling motor which caused an oscillatory movement in the vertical direction in the filter. Various frequencies of vibration were evaluated. The treatment of the experimental data been accomplished through the use of correlations are well established in the literature (Ergun, 1952 and Endo, 1998). The influence of different vibration frequencies is evaluated through the study of the structural parameters of the filtration cake. It was also performed the calculation of Euler number for understanding of energy demand of the proposed system. It found that the frequency of mechanical vibration, concomitantly with filtration process, affects the formation structure of the filtration cake. In the proposed system, the vibration contributed to the formation of thinner and less porous filtration cake, for all tested dusty materials, which increased the energy demand of the process. However, the adhesion force per unit area was lower in filtration systems with smaller particles, in processes submitted to mechanical vibration.

Keywords: gas cleaning, gas-solid filtration, synthetic filters, particle material, frequency of vibration.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O aumento expressivo do número de habitantes no planeta, que passou de 2,05 para 7,00 bilhões de habitantes nos últimos 50 anos (FUNDO DE POPULAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2013), trouxe consigo a normatização do uso dos recursos industriais, visando, concomitante ao desenvolvimento sustentável, a conservação do meio ambiente. A Figura 1.1 mostra o aumento populacional no último século. Sabe-se que o crescimento da população acarreta o aumento na procura de produtos, o que por sua vez, sobrecarrega a demanda dos setores primário e secundário da economia, além de provocar o desenvolvimento do setor terciário, devido à intensa procura por serviços.

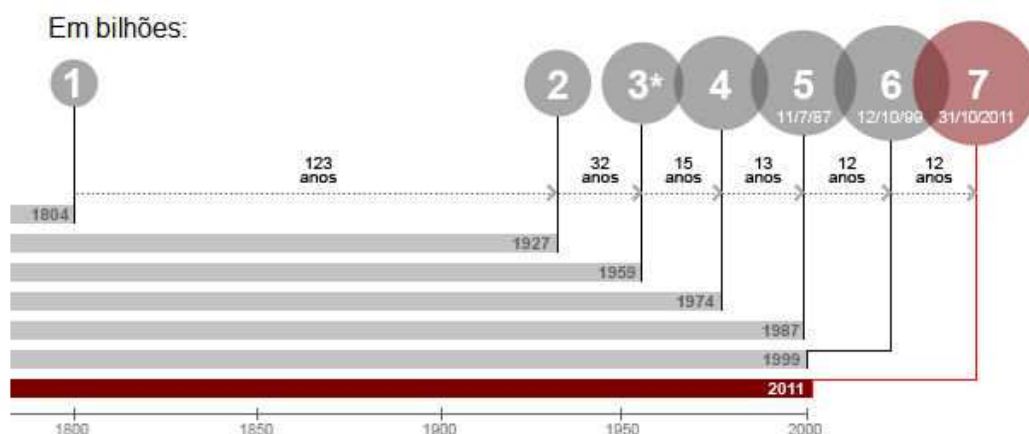


Figura 1.1 – Crescimento Populacional (Fonte: FUNDO DE POPULAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2013).

O aumento da demanda do setor primário está diretamente ligado à exploração irresponsável dos recursos naturais, o que provoca a degradação do meio ambiente. O reflexo do crescimento populacional no setor secundário é visto na acirrada disputa na oferta de produtos pelas indústrias, que, em busca de lucros cada vez maiores, fazem uso indevido dos recursos naturais, sem a devida observação às normas regulamentadoras da exploração de tais recursos. Agravando mais a situação, sabe-se que há descarte de resíduos, provenientes da manipulação industrial dos recursos naturais, para o meio ambiente.

A fim de evitar a contaminação do meio ambiente, controlando e reduzindo a emissão de poluentes, foi criado um conjunto de normas, o ISO 14000, que define as diretrizes da gestão ambiental para as empresas públicas e privadas. Tais normas foram definidas pela Organização Internacional para Padronização (ISO). A empresa que segue as normas estabelecidas obtém o Certificado ISO 14000, o que atesta a sua responsabilidade ambiental, valorizando assim os seus produtos e marcas (ISO 14000).

Concernente à poluição do ar, foram estabelecidos padrões de qualidade do ar, que definem legalmente o limite máximo para a concentração de um poluente na atmosfera, visando à proteção da saúde e do meio ambiente. Os padrões nacionais foram estabelecidos pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente) e aprovados pela Resolução 03/90 do CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). As legislações estaduais que definem os padrões de qualidade do ar adotam os valores fixados pelo CONAMA, como é o caso da Fundação Estadual do Meio Ambiente do Estado de Minas Gerais (FEAM) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). O Decreto Estadual de São Paulo nº 59113 de 23/04/2013, baseando-se nas diretrizes estabelecidas pela OMS (Organização Mundial da Saúde), determinou os valores limites para a emissão de poluentes, conforme a Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Padrões de Qualidade do Ar (Fonte: COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Poluente	Tempo de Amostragem	MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas Inaláveis (MP₁₀)	24 h ¹	120	100	75	50
	MGA ²	40	35	30	20
Partículas Inaláveis Finas (MP_{2,5})	24 h ¹	60	50	37	25
	MAA ³	20	17	15	10
Dióxido de Enxofre (SO₂)	24 h ¹	60	40	30	20
	MAA ³	40	30	20	-
Dióxido de Nitrogênio (NO₂)	1 h ¹	260	240	220	200
	MAA ³	60	50	45	40
Ozônio (O₃)	8 h	140	130	120	100
Monóxido de Carbono (CO)	8 h	-	-	-	9 ppm
Fumaça (FMC)	24 h ¹	120	100	75	50
	MAA ¹	40	35	30	20
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 h ¹	-	-	-	240
	MGA ²	-	-	-	80

¹Média Aritmética Anual. ²Média Geométrica Anual.

Conforme visto na Tabela 1.1, os padrões de qualidade do ar são classificados em metas intermediárias e padrões finais, sendo:

- MI1 (Meta Intermediária da Etapa 1) – Valores de concentração de poluentes atmosféricos respeitados a partir de 24/04/2013;
- MI2 (Meta Intermediária da Etapa 2) – Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, entrando em vigor após avaliações realizadas na Etapa 1;
- MI3 (Meta Intermediária da Etapa 3) – Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados nos anos subsequentes à MI2;
- PF (Padrões Finais) – Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

O excesso de poluição no ar é prejudicial à saúde humana, podendo causar doenças graves.

Além da preocupação com a emissão de partículas para o ar, há também estudos que se concentram na limpeza do ar, pesquisando mecanismos eficientes de recolhimento de partículas, seja para recuperação de material ou seu descarte de forma responsável.

Dentre os vários processos de separação gás-sólido, a filtração utilizando filtros de tecido é bastante usual, devido à sua alta eficiência de coleta, à facilidade de operação e ao seu baixo custo de instalação. Os processos convencionais de filtração utilizam diferentes mecanismos de limpeza do filtro, sendo os mais comuns: vibração mecânica, jato reverso de ar e pulso reverso de ar. Este último é o único mecanismo que permite uma operação contínua de filtração, sem necessidade de interrupção para limpeza, pois os pulsos ocorrem em frações de segundo. No entanto, esse mecanismo, além de ter alto custo de instalação e operação, provoca um maior desgaste das fibras do tecido, diminuindo sua vida útil.

Vários estudos têm sido desenvolvidos sobre este tema, visando a encontrar soluções mais eficientes e com menores gastos energéticos.

A ideia do presente trabalho foi fornecer uma contribuição ao estudo da Tecnologia da Filtração, propondo a avaliação de um sistema de separação gás-sólido que opere acoplado a um motor, o qual imprime uma vibração contínua ao filtro de tecido. A influência da vibração mecânica nos parâmetros da torta de filtração foi avaliada.

Portanto, os objetivos deste estudo foram:

- Objetivo Geral – avaliar a influência da frequência de vibração em operação contínua nos sistemas convencionais de filtração gás-sólido;
- Objetivos Específicos – verificar a influência da frequência de vibração na formação da torta de filtração, avaliando os parâmetros: porosidade da torta de filtração (ε); massa de pó acumulada por unidade de área (W); arraste do filtro (S); resistência específica do meio filtrante (k_1); resistência específica da torta de filtração (k_2), espessura da torta de filtração (L); gastos energéticos (Eu) e força de adesão entre as partículas e o meio filtrante, através da comparação com os resultados obtidos pelo sistema operando sem vibração mecânica. As condições avaliadas foram:
 - Frequências de vibração baixas, médias e altas;
 - Meios filtrantes de poliéster e polipropileno;
 - Materiais particulados com diferentes distribuições granulométricas e fatores de forma;
 - Ciclos de filtração com limpeza por ar reverso;
 - Teste com aterramento;
 - Teste com vibração intermitente;
 - Testes com vibração contínua, concomitante ao processo de filtração.

A disposição das informações segue a estrutura:

- No **Capítulo 2** é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a limpeza de gases, contemplando os principais trabalhos relacionados à filtração gás-sólido, mostrando a evolução do conhecimento nesta área de estudos.
- No **Capítulo 3** são detalhados os equipamentos usados para a realização dos testes, bem como os materiais utilizados e a metodologia empregada na coleta de resultados.
- No **Capítulo 4** são apresentados e discutidos os resultados obtidos com base no emprego de correlações mencionadas na literatura.
- No **Capítulo 5** são apresentadas as principais conclusões do estudo realizado neste trabalho, bem como as sugestões para o prosseguimento dos estudos nesta linha de pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os temas pertinentes ao entendimento mais completo do assunto abordado. Partindo de uma explanação sobre a poluição atmosférica e suas implicações no contexto da higiene ocupacional, o presente capítulo destaca a importância dos processos de filtração gás-sólido na limpeza de gases. Os conceitos desse mecanismo de separação são expostos, bem como os modelos desenvolvidos, os quais permitem o conhecimento do sistema por meio da avaliação dos vários parâmetros do estudo. Por fim, os trabalhos mais relevantes sobre o tema em questão são mencionados, o que possibilita a compreensão e contextualização do presente trabalho.

2.1 Poluição Atmosférica

O crescente aumento populacional no mundo trouxe consigo o aumento na demanda de produtos e serviços. A falta de cuidado na administração dos recursos naturais e industriais tem causado danos irreparáveis ao meio ambiente e à saúde da humanidade. Com o objetivo de reduzir, ou até mesmo eliminar, as emissões de poluentes para meio ambiente, normas ambientais foram estabelecidas.

Mais especificamente em relação à poluição do ar, o Instituto Nacional do Meio Ambiente (IBAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) definiram legalmente padrões nacionais de limite máximo para a concentração de poluentes na atmosfera.

A emissão por veículos automotores é uma das fontes de poluição do ar por partículas. Com o objetivo de reduzir e controlar a contaminação atmosférica por fontes móveis (veículos automotores), o CONAMA criou os Programas de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores: PRONCOVE (automóveis) e PROMOT (motocicletas), os quais estabelecem os limites máximos de emissão, fixam prazos e estabelecem exigências tecnológicas para veículos (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE).

Os resultados obtidos desde a implantação de tais programas mostraram-se favoráveis, sendo que alguns dos resultados mais expressivos do PRONCOVE/PROMOT foram: modernização do parque industrial automotivo brasileiro, melhoria da qualidade dos combustíveis automotivos e redução, na fonte, de até 97% da emissão de poluentes. A Figura 2.1 mostra uma previsão para os próximos anos da redução significativa dos fatores de emissão de material particulado por veículos.

Os efeitos da inalação de partículas pelo organismo humano dependem de alguns fatores, como: tempo de exposição à poeira, composição química da mesma e sua concentração no ar; e local de deposição no sistema respiratório, que é determinado pelo tamanho da partícula inalada. Essas variáveis determinam o risco da exposição, uma vez que, dentre as partículas que penetram no trato respiratório, nem todas chegam ao pulmão. As partículas podem ser classificadas quanto a (SANTOS, 2001):

- Forma: esse fator influencia o processo de impactação e deposição inercial no sistema respiratório;
- Origem: mineral, vegetal ou animal;
- Tamanho e Distribuição de Tamanhos: o local de deposição no organismo depende diretamente do tamanho das partículas.

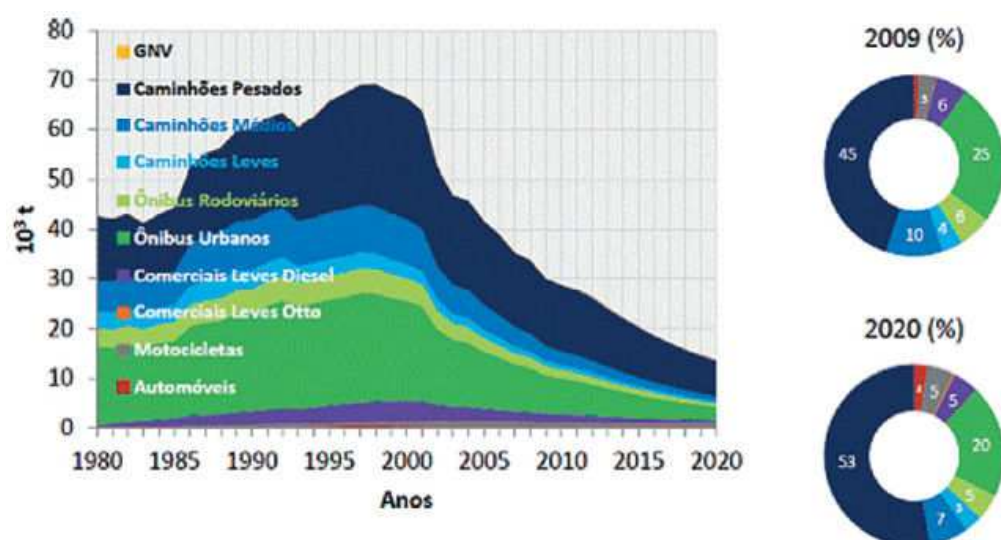


Figura 2.1 – Emissões estimadas de material particulado (Fonte: PRONCOVE, 2011).

Os estudos de Higiene Ocupacional classificam as faixas de tamanhos de partículas, relacionando-as ao seu local de deposição, como (FUNDACENTRO, 2009):

- Inaláveis: partículas menores que 100 μm , capazes de penetrar pelo nariz e pela boca;
- Torácicas: partículas menores que 25 μm , capazes de penetrar além da laringe, indo até as vias aéreas pulmonares;
- Respiráveis: partículas menores que 10 μm , capazes de penetrar na região alveolar, depositando-se na região de troca de gases dos pulmões.

A inalação das poeiras pode causar efeitos adversos ao organismo, desde simples incômodos e alergias até doenças graves, como câncer. Apesar do aparelho respiratório interceptar a maior parte das partículas inaladas antes de atingir as partes mais delicadas do pulmão, a capacidade do organismo de autoproteção e reparo de danos tem um limite. Estudos realizados nos últimos anos, para quantificar a fração de partículas suspensas no ar que realmente entram no sistema respiratório, concluíram que partículas maiores que 100 μm possuem pequena probabilidade de penetração no sistema respiratório (LIDÉN, 1994; VINCENT; MARK, 1990). Para melhor compreensão, o trato respiratório foi dividido em regiões consideradas bases anatômicas para a identificação das frações de partículas relevantes, conforme se vê na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Divisão do trato respiratório em bases anatômicas de referência segundo o mecanismo de deposição das partículas (SANTOS, 2001).

Região	Estruturas Anatômicas	Localização	Doenças Relacionadas
Vias aéreas superiores	Nariz	Extratorácica	Irritação do septo nasal, faringe e laringe, Câncer de faringe e laringe
	Boca		
	Nasofaringe		
	Orofaringe		
	Laringofaringe		
	Laringe		
Região Traqueobronqueal	Traqueia	Torácica (pulmonar)	Broncoconstrição, Bronquite crônica, Câncer bronquial
	Brônquios		
	Bronquíolos (bronquíolos terminais)		
Região de Troca de Gases	Bronquíolos respiratórios	Alveolar	Pneumoconioses, Efisema, Alveolite, Câncer pulmonar
	Dutos alveolares		
	Sacos alveolares		
	Alvéolos		

Visando à redução da poluição no ar, no início da década de 90, deu-se início à harmonização internacional das definições quantitativas das massas de particulado capazes de penetrar em cada uma das regiões apresentadas na Tabela 2.1. As porcentagens em massa representativas dos tamanhos de partículas em cada fração são mostradas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Convenções adotadas pela ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*, 1993), ISO (*International Standards Organization*) e CEN (*Comité Européen de Normalisation*) para porcentagens em massa de poeira inalável, torácica e respirável (SANTOS, 2001).

Inalável		Torácica		Respirável	
Diâmetro Aerodinâmico das Partículas (µm)	Massa de Particulado Inalável (MPI) (%)	Diâmetro Aerodinâmico das Partículas (µm)	Massa de Particulado Torácico (MPT) (%)	Diâmetro Aerodinâmico das Partículas (µm)	Massa de Particulado Respirável (MPR) (%)
0	100	0	100	0	100
1	97	2	94	1	97
2	94	4	89	2	91
5	87	6	80,5	3	74
10	77	8	67	4	50
20	65	10	50	5	30
30	58	12	35	6	17
40	54,5	14	23	7	9
50	52,5	16	15	8	5
100	50	18	9,5	10	1
		20	6		
		25	2		

O diâmetro aerodinâmico de uma partícula é medido através da determinação da velocidade da partícula em um fluxo conhecido. Instrumentos como o *Aerodynamic Particle Sizer Spectrometer* e o *Aerosizer Particle Size Analyzer* da *TSI Incorporated*, são utilizados para medi-lo. O diâmetro aerodinâmico equivalente é definido como o diâmetro de uma partícula esférica de densidade igual a uma unidade, que tem o mesmo comportamento aerodinâmico que a partícula real, levando-se em consideração seu tamanho, forma e densidade. O conhecimento desse parâmetro é uma informação crucial para determinar se uma partícula é capaz de penetrar em um filtro, ou de ser removida por um separador de partículas ou se ela vai se depositar no pulmão. O diâmetro médio que mais se aproxima do diâmetro aerodinâmico médio é o diâmetro médio mássico, que é o diâmetro baseado na massa das partículas, para o qual metade da massa das partículas é constituída por partículas com diâmetro menor que o diâmetro linear, e a outra metade, por partículas de diâmetro maior. O diâmetro médio mássico é o diâmetro que melhor caracteriza a deposição de partículas no trato respiratório (SANTOS, 2001).

2.2 Rocha Fosfática

O uso da rocha fosfática como material particulado nos experimentos de filtração gás-sólido advém do domínio já adquirido pelo uso em diversos trabalhos sobre separação de partículas. Trata-se de um material higroscópico, com perfil de concentração de elementos e características físicas conhecidas.

No Brasil, 68% da rocha fosfática é destinada à indústria de fertilizantes. No entanto, esse material tem aplicações variadas, como na alimentação animal e nas indústrias químicas. A rocha fosfática (ou fosfato natural) é comercialmente expressa sob a forma de pentóxido de fósforo (P_2O_5). Depois de extraída, ela é tratada e comercializada na forma de concentrados fosfáticos com 30% - 38% de P_2O_5 , sendo estas as fontes primárias e únicas de fósforo dos fertilizantes. A Figura 2.2 mostra o consumo de rocha fosfática pelos diferentes setores industriais no Brasil, em 2005 (KULAIF, 2009).

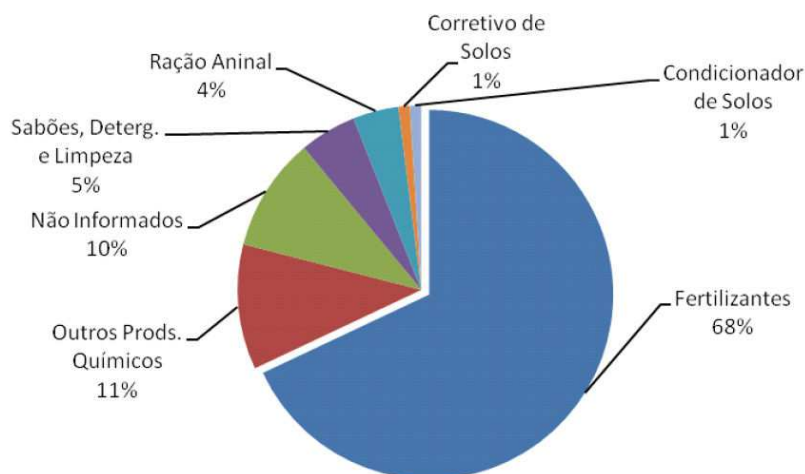


Figura 2.2 – Consumo de rocha fosfática no Brasil em 2005 (KULAIF, 2009).

No entanto, a produção de rocha fosfática gera resíduos sólidos, os quais devem ser tratados para impedir a contaminação do meio ambiente. Os resíduos sólidos são provenientes de duas etapas da produção do material: a mineração e o beneficiamento dos minérios. Na etapa de mineração, destacam-se os impactos gerados pela relação entre estéreis e minérios na maior parte das minas brasileiras. Na etapa de beneficiamento mineral, o grande volume de rejeitos está na raiz dos principais impactos ambientais, observados no uso da terra e da água, já que as barragens de rejeitos e seus reservatórios ocupam terras agricultáveis ou áreas de conservação, além da apropriação de trechos do próprio corpo d'água nos empreendimentos (KULAIF, 2009).

2.3 Limpeza de Gases

Além da preocupação com a emissão de partículas no ar, há também esforços no sentido de tratar o ar no qual há partículas suspensas, processo chamado de limpeza de gases. A Tabela 2.3 compara as condições de operação de vários tipos de equipamentos de separação de partículas de correntes gasosas, mostrando a eficiência de coleta para três faixas de tamanhos de partículas.

Tabela 2.3 – Equipamentos e Mecanismos Industriais de Limpeza de Gases (HOLDICH, 2002).

Equipamentos	Eficiência de Coleta (%):			Altas Temperaturas	Custo Relativo*
	50 μm	5 μm	1 μm		
Coletor Inercial	95	16	6	Sim	1
Ciclone de Média Eficiência	94	27	8	Sim	3
Ciclone de Baixa Resistência Celular	98	42	13	Sim	2
Ciclone de Alta Eficiência	96	73	27	Sim	4
Impingement Scrubber (Lavador de Impacto)	98	83	38	Não	7
Self-induced Spray Deduster (Desempoeirador de Pulverização)	100	93	40	Não	5
Void Spray Tower (Torre de Pulverização)	99	94	55	Não	11
Leito Fluidizado Scrubber	>99	99	60	Não	8
Irrigated Target Scrubber	100	97	80	Não	6
Precipitador Eletrostático	>99	99	86	Sim	9
Precipitador Eletrostático Irrigado	>99	98	92	Não	13
Flooded-Disc Scrubber de Baixa Energia	100	99	96	Não	10
Flooded-Disc Scrubber de Média Energia	100	>99	97	Não	15
Venturi Scrubber de Média Energia	100	>99	97	Não	14
Precipitador Eletrostático de Alta Eficiência	100	>99	98	Sim	16
Venturi Scrubber de Alta Energia	100	>99	98	Não	18
Filtro de Tecido com Agitador (Vibratório)	>99	>99	99	Não	12
Filtro de Tecido com Jato Reverso	100	>99	99	Não	17
Filtro Cerâmico	100	>99	>99	Sim	18

*Custo Relativo por 1000 m³ de gás tratado.

As operações de separação de material particulado em correntes gasosas são variadas e eficientes, conforme se vê na Tabela 2.3. Sua escolha depende do destino da partícula recolhida (recuperação ou descarte), da natureza da partícula, das condições de operação e propriedades do gás de transporte, dos custos necessários para a execução do projeto e do volume de material a ser separado, dentre outras particularidades de cada processo.

2.4 Filtração Gás-Sólido

A operação de filtração no qual partículas em suspensão na corrente gasosa são interceptadas por um feltro sintético, formando as chamadas ‘tortas’ de filtração, destaca-se entre os demais procedimentos de separação gás-sólido existentes, de acordo com Tanabe (2008). A operação de filtração ocorre, inicialmente, com a captura de partículas no interior do meio filtrante, o que caracteriza a filtração interna. A partir daí, o material pulverulento passa a ser depositado na superfície do meio filtrante, formando a torta de filtração, que, então, se torna o principal meio filtrante na operação. A Figura 2.3 mostra um esquema da formação da torta de filtração.

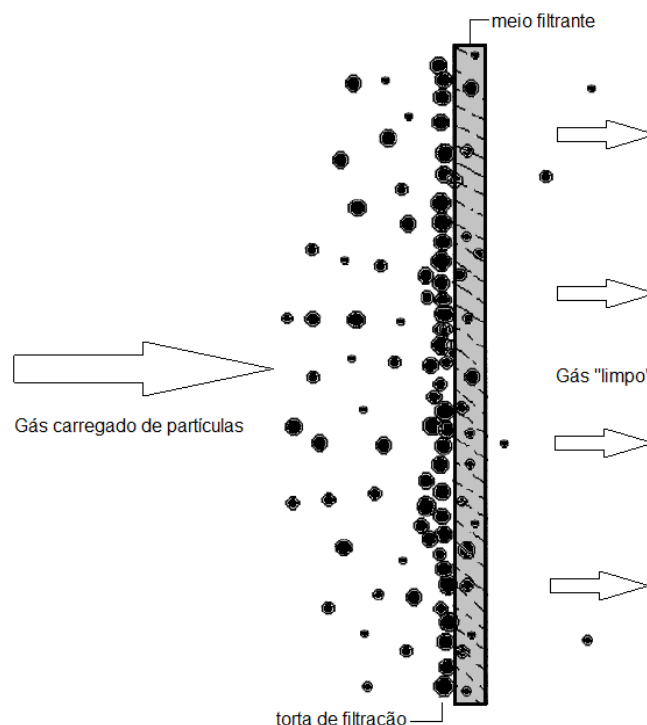


Figura 2.3 – Esquema da formação da torta (Fonte: Acervo pessoal).

Vários fatores podem interferir na operação de filtração e consequente formação da torta. Rodrigues (2004) destacou as características do tecido de filtração e do material

particulado, a velocidade de filtração, a densidade e viscosidade do gás e a espessura da torta como variáveis que influenciam diretamente na eficiência e viabilidade econômica deste método de limpeza de gases.

2.4.1 Meio Filtrante

Segundo Rocha (2010), os filtros de manga estão entre os sistemas mais utilizados nessa operação, pois apresentam alta eficiência de coleta para partículas inaláveis. Além disso, a relação custo-benefício é vantajosa, uma vez que a facilidade de manuseio e os baixos custos de manutenção desse tipo de sistema o colocam entre os mais usuais nas indústrias.

Os filtros de tecido possuem elevada eficiência de coleta para uma ampla faixa de distribuição granulométrica, conforme Hinds (1999). Mesmo tendo abertura entre os poros de aproximadamente 100 μm , os meios filtrantes comerciais removem, eficientemente, partículas menores que 0,5 μm . Há também considerável remoção de partículas menores que 0,01 μm (THEODORE; BUONICORE, 1988) *apud* TANABE (2008).

As mangas são constituídas por tecidos, que podem ser naturais ou sintéticos. A Figura 2.4 ilustra a diferença estrutural entre os tipos de tecidos.

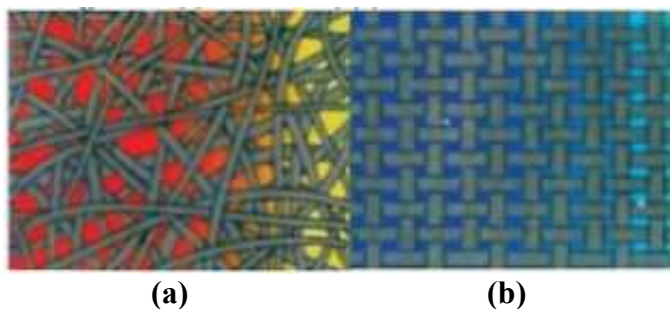


Figura 2.4 – Diferença entre a estrutura dos tecidos de fibra sintética (a) e fibra natural (b) (CERON *et al.*, 2010).

Os tecidos naturais ou de fios trançados possuem muitas limitações em suas propriedades físicas, mas ainda são empregados em muitos processos de filtração (DONOVAN, 1985). Os tecidos sintéticos, ou não trançados, também denominados de feltros, são constituídos por fibras artificiais, as quais incluem acetatos, acrílicos, poliamidas, poliésteres, poliolefinas, dentre outras. Os feltros, por apresentarem baixo custo, maior resistência química e física e um menor diâmetro das fibras, são os tipos de filtro mais utilizados. Conforme a NBR 13370, um tecido não trançado ou feltro é formado por uma estrutura plana, flexível e porosa, constituída por uma manta de fios que são mecânica,

química e/ou termicamente tratados. Theodore e Buonicore (1988) afirmaram que feltros limpos são mais eficientes que filtros trançados limpos. Donovan (1985), afirmou que em tecidos não trançados a formação da torta ocorre mais lentamente que em tecidos trançados, pois nestes o espaço disponível para passagem do fluxo é mais concentrado do que naqueles, sendo que o bloqueio desta passagem ocorre mais rapidamente por causa do fluxo concentrado.

Alguns aspectos devem ser avaliados para se escolher um bom filtro. As características estruturais do meio filtrante, associadas às particularidades do material pulverulento, bem como às condições operacionais do processo, definem a eficiência da filtração. O objetivo do processo de separação gás-sólido (descarte ou recuperação de material) é que determinará a melhor combinação entre o filtro escolhido e as condições operacionais.

A distribuição de fibras no tecido não é uniforme, o que especifica as características estruturais do meio filtrante: permeabilidade e porosidade superficial. Por causa desse aspecto, Martins (2001) verificou que a profundidade de deposição de partículas não é homogênea no meio filtrante, sendo maior quando o processo ocorre a maiores velocidades de filtração. A deposição de partículas é mais profunda em feltros com abertura mais ampla na superfície (TANABE *et al.*, 2011). No entanto, as características do material particulado, assim como as do meio filtrante, também exercem influência na profundidade de deposição das partículas, o que é “sentido” na queda de pressão residual do sistema (TANABE, 2008).

2.4.2 Torta de Filtração

A operação de filtração pode ocorrer de duas maneiras: por fluxo cruzado, no qual o fluxo de ar é aproximadamente paralelo à superfície do meio filtrante, sendo que apenas uma pequena proporção do fluxo atravessa o meio filtrante, depositando partículas em sua superfície; e, o modo mais convencional para separação de aerossóis, a filtração direta, conhecida como “*dead-end*” *filtration*, durante a qual o fluxo de ar é aproximadamente perpendicular à superfície do meio filtrante. Em ambos os casos, a maioria dos estudos é realizada utilizando-se o meio filtrante em formato de discos planos. Na filtração cruzada, a formação e o destacamento da torta ocorrem simultaneamente, pois as partículas que formam a torta de filtração podem ser removidas pelo cisalhamento das forças resultantes da passagem do fluxo de ar. Já na filtração direta, a formação e o destacamento da torta são processos

intermitentes (SIBANDA *et al.*, 2001). Alega-se que a filtração cruzada, método com aplicação considerável em processos de separação sólido-líquido, forneça tortas que representem melhor as propriedades das tortas formadas em filtros de manga (KOCH *et al.*, 1996).

As tortas de filtração são formadas num processo constituído por três etapas: filtração de profundidade, etapa de transição e filtração superficial. A filtração de profundidade ocorre quando as partículas penetram no interior do tecido, ficando retidas em suas fibras. Na etapa de transição há formação de dendritos, que são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante. Após a formação da torta, inicia-se a etapa de filtração superficial, durante a qual a própria torta de filtração age como meio filtrante, sendo capaz de remover as partículas mais finas da corrente gasosa. A melhor eficiência de remoção do sistema é alcançada quando a filtração superficial é rapidamente estabelecida (RODRIGUES, 2006).

Como os tecidos não são materiais uniformes, fisicamente é impossível se obter o momento exato da formação da torta. No entanto, alguns autores encontraram o ponto de colmatação (ponto em que a torta se forma) experimentalmente. Japuntich *et al.* (1997) definem o ponto de colmatação como sendo a capacidade de retenção do meio. Esse ponto pode ser obtido geometricamente, no gráfico de perda de carga em função da carga mássica, pela assíntota da curva com o eixo das abscissas, que indica a massa necessária de material pulverulento para formar a torta (WALSH, 1996). Isso pode ser visto na Figura 2.5.

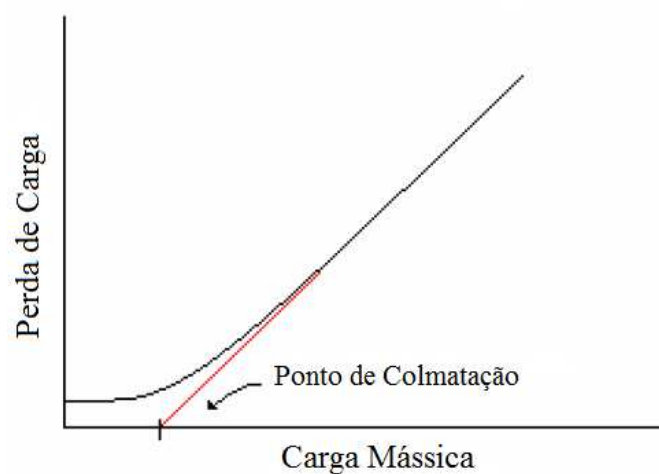


Figura 2.5 – Determinação do ponto de colmatação (RODRIGUES, 2006, adaptação de WALSH, 1996).

Quanto maior for a compactação dos filtros e menores forem as partículas, mais rápido o ponto de colmatção será atingido (WALSH, 1996), (GRAEF *et al.* 1995, *apud* TANABE, 2008) (WALSH; STENHOUSE, 1997).

A porosidade é uma importante propriedade da torta de filtração. Conhecer essa propriedade permite avançar nos estudos relacionados ao tema. As correlações encontradas na literatura para o cálculo da porosidade serão expostas no tópico 2.4.4 deste trabalho.

2.4.3 Mecanismos de Limpeza

Vários estudos têm sido realizados sobre o desprendimento da torta de filtração. A Tabela 2.4 apresenta um resumo dos principais trabalhos nessa linha de pesquisa, nos quais a técnica experimental utilizada consistia num aumento gradual da intensidade de limpeza no mecanismo escolhido (aceleração: por centrifuga ou por teste de impulso e fluxo de ar reverso) e medição da quantidade de pó removida (KOCH *et al.*, 1996).

O destacamento da torta frequentemente ocorre por um fenômeno conhecido como *patchy cleaning*, ou limpeza por blocos, durante a qual há o desprendimento apenas de algumas partes da torta de filtração. Não se sabe, ao certo, o porquê desse comportamento em condições moderadas de limpeza, sendo apontada a não uniformidade do meio filtrante e da torta de filtração como possível explicação para essa ocorrência (KOCH *et al.*, 1996).

A limpeza do filtro de tecido pode ser realizada de formas distintas, sendo os mecanismos mais comuns: o pulso de ar reverso, o fluxo de ar reverso sem flexibilidade, o fluxo de ar reverso com colapso, a vibração mecânica, a vibração sônica e a limpeza manual. Dentre esses mecanismos, o pulso de ar reverso, o fluxo de ar reverso e a vibração mecânica têm seu uso destacado (TIENE, 2005; FARGNOLI, 2010).

O Pulso de Ar Reverso apresenta uniformidade de limpeza muito boa, opera com altas velocidades de filtração e carga de poeira, além de permitir a limpeza do tecido sem a interrupção da filtração, pois o pulso de ar reverso acontece em frações de segundos. No entanto, sua desvantagem está no alto custo do equipamento, alto consumo de energia e no maior desgaste das fibras do tecido, o que diminui tanto o tempo de vida útil do tecido quanto a eficiência de coleta de pó.

Tabela 2.4 – Estudos do destacamento da torta de filtração (KOCH *et al.*, 1996).

Referências	Hahnheiser (1970)	De Ravin (1986)	Morris et al (1987)	Sievert (1987)	Cheung (1989)	Aguiar e Coury (1992)	Koch et al (1993)
Método	Aceleração: centrífuga	Aceleração: teste de impulso	Aceleração: teste de impulso	Aceleração: teste de impulso e Fluxo reverso	Fluxo reverso	Fluxo reverso	Aceleração: centrífuga e Fluxo reverso
Arranjo da Filtração	Vertical: cruzada	Vertical: cruzada	Vertical: cruzada	Vertical: cruzada	Horizontal: direta	Horizontal: direta	Horizontal: direta
Área de Filtração (m ²)	0,001	0,045	0,09	0,015	0,0013	0,045	0,0013
Meio filtrante	Poliestireno	Vários feltros	Poliéster agulhado	Poliéster agulhado	Cerâmica granular e fibrosa	Poliéster agulhado	Cerâmica fibrosa
Material Particulado	Quartzo	Alumina e cinzas	Sílica	Carbonato de cálcio	Carvão e cinzas	Rocha fosfática	Calcário
Diâmetro mássico médio (µm)	4,5	6,6/9,6	6,2	4,5	1,8	2,3	1,8/2,0/3,5
Velocidade de filtração (m/s)	0,01	-	0,02	0,05	0,13	0,035	0,19
Massa de pó acumulada por unidade de área (g/m ²)	90-1190	200-2400	180-969	50-1000	100-1000	290-870	100-1800
a ₅₀ (m/s ²)*	124-202	-	93-183	83-521	-	-	300-2000
v ₅₀ (m/s)**	-	-	-	0,02-0,07	-	0,02-0,14	0,02-0,62
σ ₅₀ (Pa)***	18-163	40-150	33-90	26-90	10000-50000	100-400	400-1000 (ac.) 1000-3000 (fluxo)

*a₅₀ – aceleração necessária para remover 50% da massa da torta;

**v₅₀ – velocidade do fluxo reverso necessária para remover 50% da massa da torta;

***σ₅₀ – tensão média de desprendimento da torta requerida para remover 50% da massa da torta.

O Fluxo de Ar Reverso apresenta boa uniformidade de limpeza, tem um consumo razoavelmente baixo de energia e permite uma maior vida útil do tecido, por operar com velocidades de filtração relativamente baixas. A desvantagem dessa técnica está na necessidade de interrupção do processo de filtração para se proceder com a limpeza.

O mecanismo de limpeza por vibração mecânica é o método mais antigo e de menor custo utilizado na limpeza de filtros de tecido, além de apresentar uma boa uniformidade de limpeza. Essa técnica de limpeza apresenta uma montagem relativamente simples. Os baixos custo de implantação e manutenção tornam essa operação apropriada para sistemas de pequeno e médio porte. Esse método tem, no entanto, a desvantagem da necessidade de interrupção da filtração para o procedimento de limpeza. A limpeza ocorre devido à aceleração de um motor, o qual imprime um movimento oscilatório à manga de filtração, levando ao rompimento das forças adesivas entre o meio filtrante e a torta de filtração. Como o conhecimento das variáveis de vibração envolvidas ainda é remoto, o projeto desses sistemas é basicamente empírico ou semi-empírico (RODRIGUES, 2006; MOREIRA, 1998).

Alguns fatores podem dificultar o processo de limpeza do meio filtrante, como, por exemplo, o aumento da profundidade de deposição das partículas no filtro. Nessa situação, há obstrução da passagem do ar através das fibras do filtro, o que provoca um aumento na queda de pressão residual do sistema. Quando se objetiva evitar ocorrências como esta, sugere-se a utilização de baixos valores de tempo e velocidade de filtração, o que resultará em menores profundidades de deposição de partículas (TANABE, 2008).

2.4.4 Porosidade da Torta de Filtração

A porosidade é um importante parâmetro da torta de filtração, pois dela dependem a queda de pressão do sistema, a resistência ao escoamento do fluido e a força necessária para a remoção da torta.

Dentre as metodologias para se estimar a porosidade, podem ser citados:

- método experimental, com destaque para o Método Direto, desenvolvido por Aguiar (1991), o qual consiste no pré-endurecimento da torta de filtração para posterior análise por microscopia eletrônica;
- método teórico, com destaque para o Método Indireto desenvolvido por Coury (1983).

A queda de pressão em um meio poroso pode ser estimada através da clássica correlação de Ergun (1952). Esta correlação foi desenvolvida para ser utilizada em processos cuja porosidade do leito estivesse entre 0,1 e 0,75, para tamanhos de partículas entre 10^2 e 10^4 μm , número de Reynolds da partícula maior que a unidade e, a rigor, para partículas esféricas, em leitos fixos e distribuição de tamanhos estreita (ENDO, 1998). No entanto, a correlação de Ergun tem sido utilizada para estimar a porosidade das tortas de filtração de gases formadas por partículas muito menores, com número de Reynolds da ordem de 10^{-2} e partículas com esfericidade menor que 1, tendo boa aplicabilidade nesses casos, conforme constatação experimental de Aguiar (1995) e Negrini *et al.* (1998) (SILVA NETO *et al.*, 2002).

Assim, para a remoção de partículas suspensas em corrente gasosa, utilizando-se filtro de tecido, a correlação de Ergun é representada pela Equação (2.1), na qual se observa que a porosidade da torta (ε) é função da espessura da torta de filtração (L) e de variáveis cujos valores são conhecidos, como:

- queda de pressão na torta (ΔP), sendo definida com a pressão a jusante do filtro menos a pressão a montante do mesmo;
- densidade ρ_g e a viscosidade μ do gás de arraste;
- velocidade superficial do gás, v_f ;
- diâmetro médio das partículas, d_p .

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150(1-\varepsilon)^2 \mu v_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75(1-\varepsilon) \rho_g v_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.1)$$

No entanto, há dificuldades quanto ao procedimento experimental para se medir a espessura L da torta de filtração. Pelo Método Indireto desenvolvido por Coury (1983) admite-se que, se a porosidade da torta é constante e há alta eficiência de coleta, então a massa de partículas M depositada para formar a torta, num tempo t de filtração pode ser dada pela Equação (2.2):

$$M = Qt = LA\rho_p(1-\varepsilon) \quad (2.2)$$

na qual Q é a vazão mássica de pó por unidade de tempo, ρ_p é a densidade da partícula e A é a área de filtração.

Isolando-se L na Equação (2.2) e substituindo na Equação (2.1), tem-se:

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1-\varepsilon)Q\mu v_f}{A\rho_p \varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75Q\rho_g v_f^2}{A\rho_p \varepsilon^3 d_p} \quad (2.3)$$

O segundo termo da Equação (2.3) é relativo ao componente inercial, podendo ser considerado desprezível para escoamentos puramente viscosos, como ocorre nos gases. Sendo assim, a Equação (2.4), que é a correlação de Ergun modificada em relação ao tempo de filtração, pode ser utilizada para a estimativa da porosidade das tortas de filtração.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1-\varepsilon)Q\mu v_f}{A\rho_p \varepsilon^3 d_p^2} \quad (2.4)$$

Considerando as limitações impostas pela faixa de aplicação da clássica correlação de Ergun (1952), tornou-se necessário o desenvolvimento de uma equação que pudesse ser utilizada para acondicionamento em camadas constituídas por partículas polidispersas e com formas irregulares (ENDO, 1998). Assim, Endo (1998) desenvolveu a Equação (2.5), a partir da qual é possível se estimar a porosidade da torta de filtração, levando-se em consideração a polidispersão das partículas, bem como o seu formato.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{180k(1-\varepsilon)\mu v_f}{\varepsilon^3 d_g^2 e^{(4\ln^2 \sigma_g)}} \frac{Q}{A\rho_p} \quad (2.5)$$

Na Equação (2.5), σ_g é o desvio padrão do diâmetro médio geométrico (d_g) das partículas e k é o fator de forma dinâmico das partículas, o qual pode ser calculado pela Equação (2.6). O fator de forma dinâmico, k , é definido como a razão da força de arraste na partícula, em determinada velocidade, e a força de arraste em uma esfera de mesmo volume e velocidade (DAVIES, 1979).

$$k = \frac{C_v}{C_{St}} \left(\frac{d_v}{d_{St}} \right)^2 \quad (2.6)$$

Na Equação (2.6), d_v corresponde ao diâmetro de uma esfera equivalente, d_{St} é o diâmetro de Stokes e, C_v e C_{St} são, respectivamente, os fatores de escorregamento de Cunningham para os diâmetros d_v e d_{St} .

2.4.5 Queda de Pressão

A queda de pressão total no filtro é o somatório das contribuições das quedas de pressão no meio filtrante e na torta de filtração, conforme a Equação (2.7).

$$\Delta P = \Delta P_m + \Delta P_c \quad (2.7)$$

A variação de pressão no meio filtrante (ΔP_m) é função da resistência específica do tecido (k_l) e da velocidade de filtração (v_f), como se vê na Equação (2.8). A resistência específica do tecido, k_l , depende de características físicas, como: tamanho dos poros, material e espessura (TSAI; CHENG, 1998).

$$\Delta P_m = k_l v_f \quad (2.8)$$

Concernente à variação de pressão na torta de filtração (ΔP_c), tem-se a Equação (2.9), na qual k_2 é a resistência específica da torta de filtração e W é a massa de pó acumulada por unidade de área.

$$\Delta P_c = k_2 v_f W \quad (2.9)$$

Substituindo-se as Equações (2.8) e (2.9) em (2.7), tem-se a Equação (2.10):

$$\Delta P = k_1 v_f + k_2 v_f W \quad (2.10)$$

Dividindo a Equação (2.10) pela velocidade do gás de arraste, v_f , chega-se à Equação (2.11), que define o arraste do filtro (S) como a perda de carga por unidade de velocidade de filtração, o que corresponde à resistência do filtro (RODRIGUES, 2006).

$$\frac{\Delta P}{v_f} = S = k_1 + k_2 W \quad (2.11)$$

A resistência específica do meio filtrante pode ser determinada pela Equação (2.12), conhecida como Equação de Darcy, a qual relaciona a queda de pressão do meio filtrante com a velocidade superficial. k_{Darcy} é a permeabilidade darciana.

$$\frac{\Delta P_m}{v_f} = k_1 = \frac{L\mu}{k_{Darcy}} \quad (2.12)$$

A resistência específica da torta, k_2 , para partículas polidispersas e em contato umas com as outras, pode ser calculada por meio da Equação (2.13), conhecida como Equação de Kozeny-Carman, na qual a constante empírica K adota os valores de 4,8 (para partículas esféricas) e 5 (para partículas irregulares), D_{VS} é o diâmetro médio de Sauter, C é o fator de escorregamento de *Cunningham* e μ é a viscosidade do gás.

$$k_2 = \frac{18\mu}{\rho_p D_{VS}^2 C} \frac{2K(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.13)$$

2.4.5.1 Queda de Pressão Residual

A queda de pressão residual caracteriza o desempenho de um filtro após a limpeza. Após a limpeza, as propriedades do meio filtrante não serão como eram inicialmente, devido à remoção incompleta da torta de filtração (CALLÉ *et al.*, 2002). Devido ao acúmulo de material particulado no tecido, o que diminui a porosidade na superfície do meio filtrante, a queda de pressão tende a aumentar após cada ciclo (MAUSCHITZ *et al.*, 2007).

No entanto, Rodrigues (2006) afirmou que os altos valores de queda de pressão residual não são apenas consequência desse acúmulo, mas, também, da associação deste acúmulo com as características do filtro. Para comprovar essa informação, Tanabe (2008), ao comparar diferentes meios filtrantes, observou que, apesar da menor profundidade alcançada pelas partículas, o meio filtrante de polipropileno foi o que obteve maiores valores de queda de pressão residual, em relação aos filtros de poliéster tratado, poliéster não-tratado e acrílico, o que se explica devido à menor abertura entre as fibras do tecido e, consequentemente, menor permeabilidade ao ar.

As condições operacionais dos processos de filtração e limpeza, as forças de adesão tecido-torta e a porosidade da torta também exercem influência na queda de pressão residual (TANABE *et al.*, 2011). Além disso, fatores como a compressão da camada de partículas coletadas pelo meio filtrante (STÖCKLMAYER; HÖFLINGER, 1998), e a velocidade de filtração, influenciam na queda de pressão residual (TOGNETTI, 2007). Silva Neto (1996) verificou que a queda de pressão residual aumenta com o aumento da velocidade de filtração, o que provoca o decréscimo na porcentagem de massa desprendida da torta.

Após vários ciclos, o valor da queda de pressão residual tende a se estabilizar, pois o tecido fica saturado de pó. São necessários no mínimo 100 ciclos de filtração para chegar ao comportamento estável (NORMA VDI 3926 *apud* TANABE, 2008). Contar o número de ciclos de mesma duração e averiguar o valor constante da queda de pressão residual, durante os ciclos, também é uma maneira de determinar a estabilidade da queda de pressão. Segundo Callé *et al.* (2002), o tempo de saturação do tecido depende do tipo de material do filtro, do tamanho das partículas e do tempo e mecanismo usados para a remoção da torta. De acordo com Koch *et al.* (1996), a queda de pressão residual sobe por um período de tempo durante a operação. Esse período, conhecido como período de condicionamento, pode continuar por até centenas de ciclos de filtração e limpeza.

As Figuras 2.6 e 2.7 mostram, respectivamente, o esquema de uma curva de condicionamento do filtro e quatro comportamentos típicos para essa curva, dependentes das características do filtro, do aerossol, de operação e de limpeza (FREITAS, 2003).

O tempo de vida útil de um meio filtrante depende do número de ciclos em que sua queda de pressão de regeneração (ou permeabilidade) fica dentro de uma faixa aceitável economicamente. Na Figura 2.7 pode-se observar que os filtros das curvas A e D são economicamente inviáveis, pois ultrapassam o valor de queda de pressão residual limite. Insistir no uso desses filtros provoca sobrecarga no sistema de arraste dos gases (soprador). Já o filtro da curva B, apesar de apresentar um longo período de condicionamento, mantém sua permeabilidade na faixa operável. O filtro da curva C é duplamente vantajoso, pois além de atingir rapidamente a estabilização, mantém sua permeabilidade na faixa operável (FREITAS, 2003).

Em casos mais extremos, a queda de pressão residual não alcança um valor constante, ou seja, o equilíbrio não é estabelecido. O condicionamento do filtro reduz a sua permeabilidade, causando uma maior queda de pressão através da torta após os primeiros ciclos (DITTLER *et al.*, 2002).

A queda de pressão residual pode ser dividida em duas frações, sendo a primeira constituída pelas partículas depositadas nas camadas internas próximas à superfície do meio poroso, as quais oferecem resistência ao fluxo de ar no interior do meio filtrante. A segunda fração da queda de pressão residual é composta pelas partículas depositadas na camada externa do filtro (MAUSCHITZ *et al.*, 2004).

O decréscimo da queda de pressão residual é o melhor efeito da limpeza (SCHMIDT; SCHÜTZ, 2012), não constituindo, porém, num indicador confiável do grau de limpeza do filtro (MOREIRA, 1998).

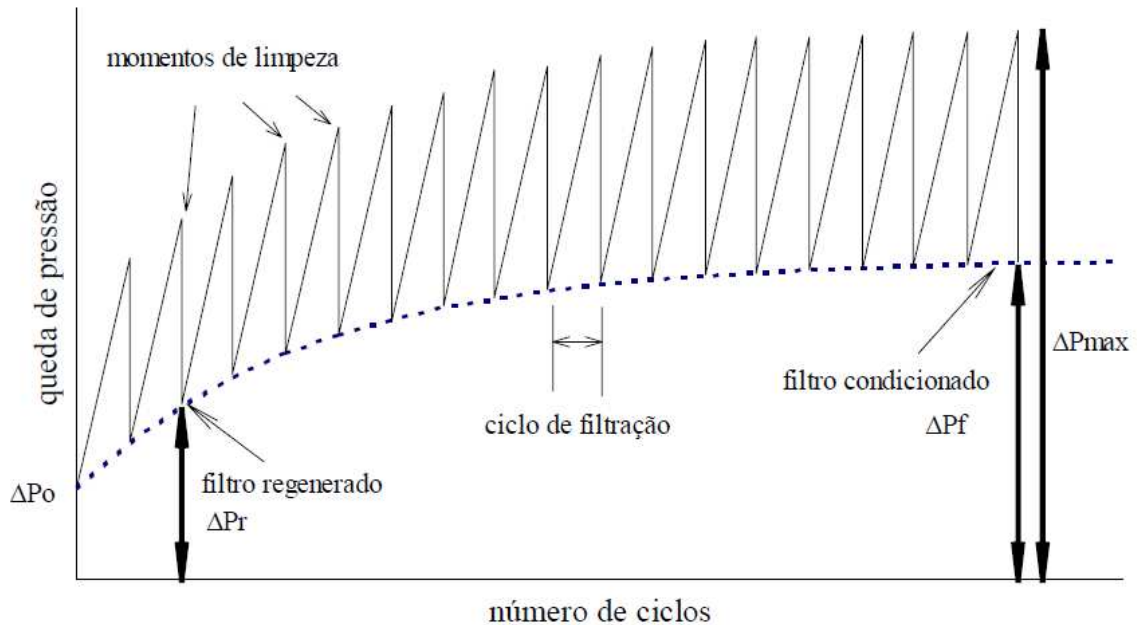


Figura 2.6 – Esquema do condicionamento do filtro (INNOCENTINI, 1997).

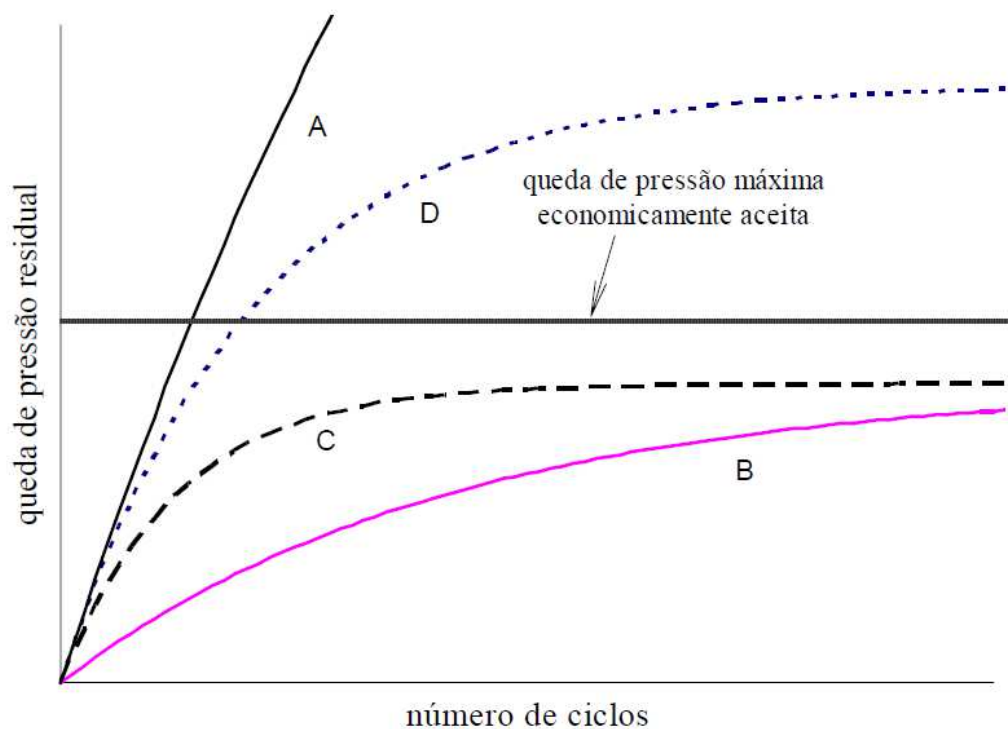


Figura 2.7 – Comportamentos possíveis para a curva de condicionamento do filtro (INNOCENTINI, 1997).

A eficiência de limpeza é melhor observada pelas curvas de filtração do que pela queda de pressão residual (MOREIRA *et al.*, 1999). Por exemplo, para um feltro de poliéster, uma limpeza deficiente seria observada se as curvas subsequentes ao primeiro ciclo tivessem concavidade para baixo, o que indicaria um rápido aumento da perda de carga. Já as curvas de comportamento similares ao do primeiro ciclo indicariam uma limpeza satisfatória (RODRIGUES, 2006).

A queda de pressão residual tem comportamentos diferentes, dependendo do mecanismo empregado na limpeza do meio filtrante. O processo de limpeza deve ser cuidadosamente realizado, pois uma limpeza de filtro mal feita ocasiona um aumento na queda de pressão residual, ao passo que uma limpeza muito rigorosa pode danificar o tecido, reduzindo seu tempo de vida útil (LORA, 2002).

Segundo MAUSCHITZ *et al.* (2004), durante a limpeza, há reorganização das partículas no interior do meio filtrante, a qual tem início com o deslocamento ou aglomeração de partículas e sua posterior difusão no interior do meio filtrante para regiões nas quais a influência no escoamento do gás será menor no ciclo seguinte. Essa nova configuração interna causa menor queda de pressão que a configuração original, antes da limpeza (ROCHA, 2010).

Quando se observa uma remoção incompleta da torta de filtração após a limpeza do filtro, o fenômeno do *Patchy Cleaning* é evidenciado, conforme se vê na Figura 2.8. A limpeza por blocos leva a um aumento da queda de pressão residual, resultando em ciclos mais curtos, o que, conseqüentemente, conduz à necessidade mais frequente de limpeza durante os ciclos (TANABE, 2008).

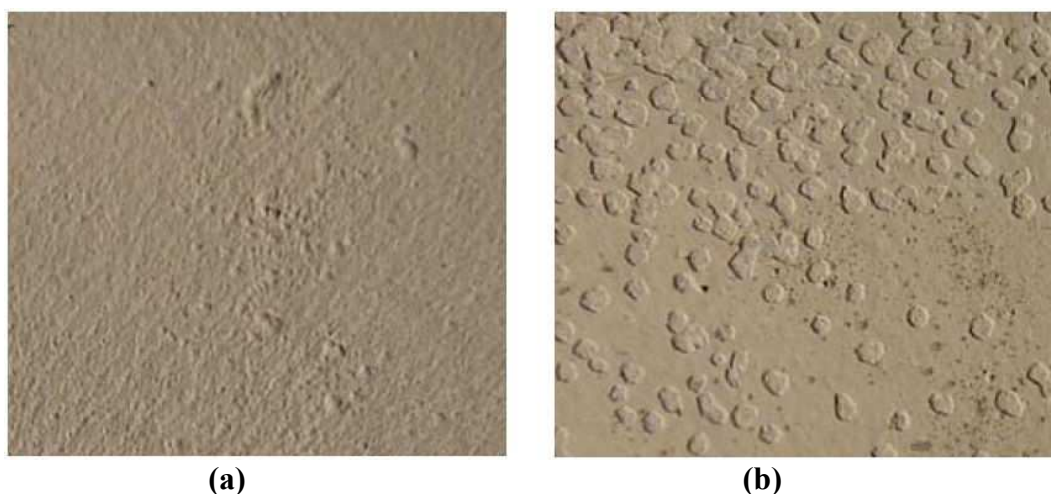


Figura 2.8 – (a) Superfície do meio filtrante com a torta de filtração e (b) fenômeno *Patchy Cleaning* (TANABE *et al.* 2008).

De acordo com Ginestet e Pugnet (2012), a queda de pressão residual é reduzida após a limpeza do filtro de tecido por jato pulsante, quando há aumento na pressão de ar comprimido. Nos testes em escala piloto de instalação de filtro de manga com jato pulsante, realizados por Saleem *et al.* (2012), usando pó de pedra calcária como material particulado, a queda de pressão residual foi quase constante, independente do limite superior de queda de pressão.

O padrão de regeneração influencia apenas a curva de queda de pressão no início do ciclo de filtração, mas não influencia o tempo dos ciclos de filtração (DITTLER; KASPER, 1999). De acordo com Moreira (1998), a forma da curva de filtração e sua evolução com os ciclos de limpeza é um indicador mais confiável do grau de limpeza do filtro do que a queda de pressão residual. Após a regeneração do filtro, o comportamento da curva pode mudar substancialmente, dependendo do comportamento da limpeza (AZEVEDO, 2009).

2.4.5 Curva de Filtração

A curva de filtração representa a perda de carga no filtro em função do tempo. Ela pode apresentar três comportamentos distintos, podendo ser: linear, com concavidade para baixo e com concavidade para cima (TANABE, 2008). Essa curva tem um comportamento diferente para cada tipo de tecido, conforme a Figura 2.9.

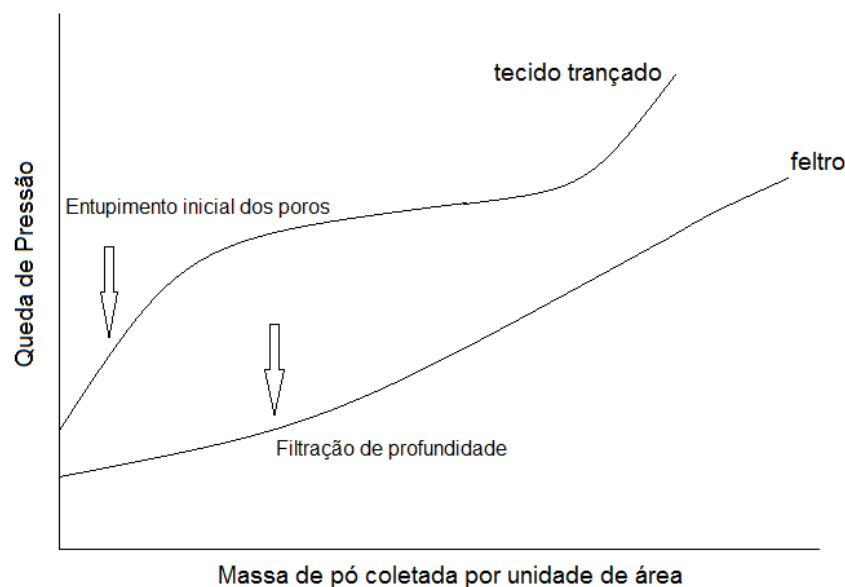


Figura 2.9 – Exemplos de curvas características para filtros de ar (SVAROVSKY, 1981).

O comportamento linear da curva indica uma deposição superficial de material particulado sobre o meio filtrante. A concavidade para baixo da curva aponta para um ciclo de filtração com um rápido aumento da queda de pressão, indicando uma rápida formação da torta de filtração. Já a curva de filtração com concavidade voltada para cima revela um período maior da filtração de profundidade, o que leva à formação mais lenta da torta de filtração (DONOVAN, 1985).

A Figura 2.10 mostra esses três comportamentos distintos, no gráfico do arraste do filtro com o tempo.

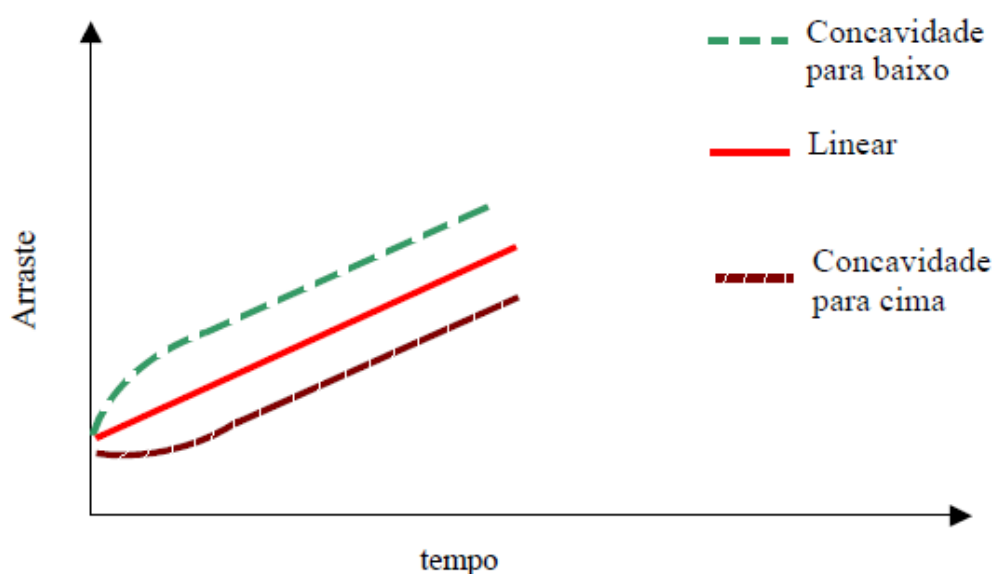


Figura 2.10 – Curvas de queda de pressão inicial durante a filtração (TANABE, 2008).

De acordo com a Comissão Alemã de Preservação do Ar (NORMA VDI 3926, 2003), os ciclos de filtração têm comportamentos descritos como: ideal, real e real com regeneração incompleta. O comportamento ideal seria observado em processos de filtração com fluxos de volume e concentração de pó constantes, limpeza dos filtros e tempo de ciclo uniformes, sendo a perda de carga residual dada pela existência de uma fina camada de pó no filtro, após a regeneração do mesmo, conforme ilustrado na Figura 2.11. Esse comportamento representa um depósito na superfície estritamente uniforme em série com o tecido, ou seja, a não penetração de pó no tecido (TIENI, 2005).

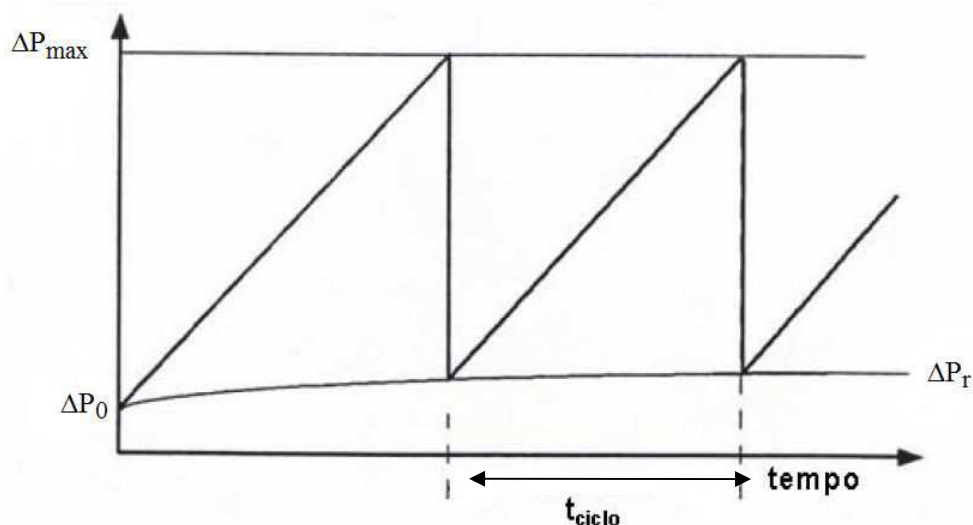


Figura 2.11 – Ciclos de filtração ideais (NORMA VDI 3926, 2003).

Os filtros de polipropileno, por exemplo, de acordo com Tognetti (2007) apresentam comportamento linear da curva de filtração. Por terem menor abertura superficial, a filtração nesse tipo de meio filtrante é caracteristicamente superficial, com baixa penetração de partículas no interior do tecido, rápida formação de torta de filtração e grande acúmulo de partículas na superfície do tecido, o que facilita a limpeza do tecido.

No comportamento real dos ciclos de filtração, o tempo de ciclo reduz em comparação ao tempo de ciclo de filtração do comportamento ideal, conforme na Figura 2.12. Observa-se que, devido à compressão da torta, as curvas de filtração não têm um comportamento linear nos primeiros ciclos.

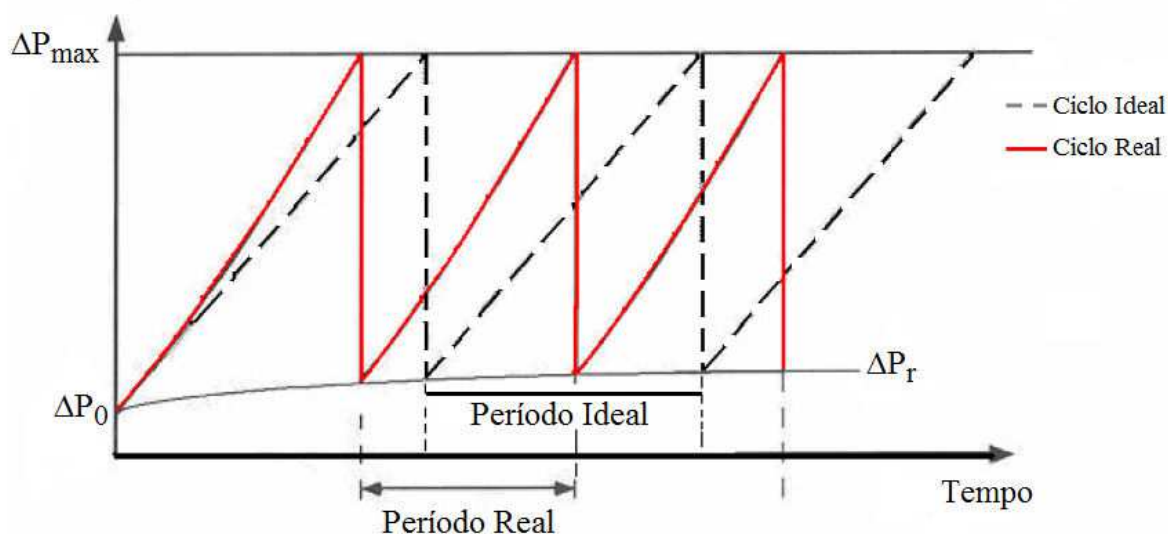


Figura 2.12 – Ciclos de filtração reais (NORMA VDI 3926).

A remoção incompleta da torta durante a limpeza após o primeiro ciclo de filtração, fenômeno ao qual chamamos limpeza parcial ou *Patchy Cleaning* (limpeza por blocos), leva à diminuição do tempo de filtração, o que torna a curva de filtração convexa, conforme a Figura 2.13. Isso é devido ao aumento da velocidade de filtração observado quando a vazão volumétrica é constante, o que leva à formação mais rápida da mesma quantidade de torta de pó. Tanabe (2008) observou que, à medida que ocorre um aumento da velocidade de filtração, a curva de filtração torna-se mais convexa nos períodos iniciais da filtração, o que provavelmente indica a ocorrência de um período maior de filtração interna no tecido e um aumento na penetração de partículas no interior do meio filtrante.

Nos filtros de acrílico, por exemplo, os períodos de filtração interna, conforme observado por Tognetti (2007), foram maiores, gerando uma curva de filtração mais convexa no início do processo de filtração. Isso se deve à maior abertura superficial e permeabilidade do acrílico. Já o meio filtrante constituído de polipropileno apresentou maior inclinação nas curvas de filtração, em relação aos meios filtrantes constituídos por acrílico e poliéster, atingindo a pressão máxima num tempo menor de filtração, com menor quantidade de sólidos (NUNES, 2011).

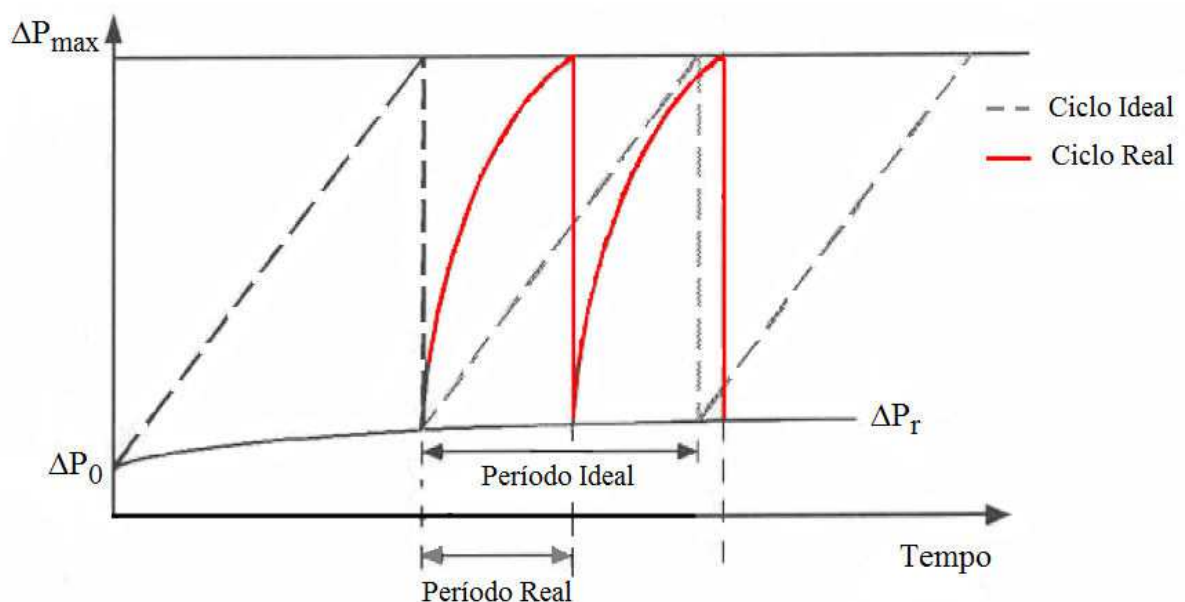


Figura 2.13 – Influência da limpeza por blocos (*Patchy Cleaning*) nos ciclos de filtração reais (NORMA VDI 3926).

Na medida em que a carga mássica vai aumentando, conforme Choi *et al.* (2004), as camadas de pó mais próximas ao tecido são comprimidas pela força de arraste causada pela

queda de pressão através das camadas superiores. Assim, o aumento da carga mássica provoca a redução da porosidade e espessura das camadas de torta inicialmente formadas, até que, em determinada espessura, a torta se torne incompressível. Quando ocorre redução da porosidade da torta de filtração devido à compressão do agrupamento de partículas no filtro, há um aumento na resistência ao fluxo de ar, o que provoca, conseqüentemente, o aumento da queda de pressão, especialmente para quedas de pressão máximas maiores que 2000 Pa (ROCHA, 2010). O fato da porosidade da torta depender da espessura e da posição da torta indica que esta é formada por camadas compressíveis (AGUIAR; COURY, 1996). A Figura 2.14 mostra o desvio na curva de filtração devido ao fenômeno de compressão da torta.

A velocidade de filtração atua no grau de compactação da torta: a torta sofrerá uma maior compactação quanto maior for a velocidade de filtração. Isso resulta numa maior resistência específica da torta, o que possibilita melhor eficiência de coleta (CHEN; HSIAU, 2009).

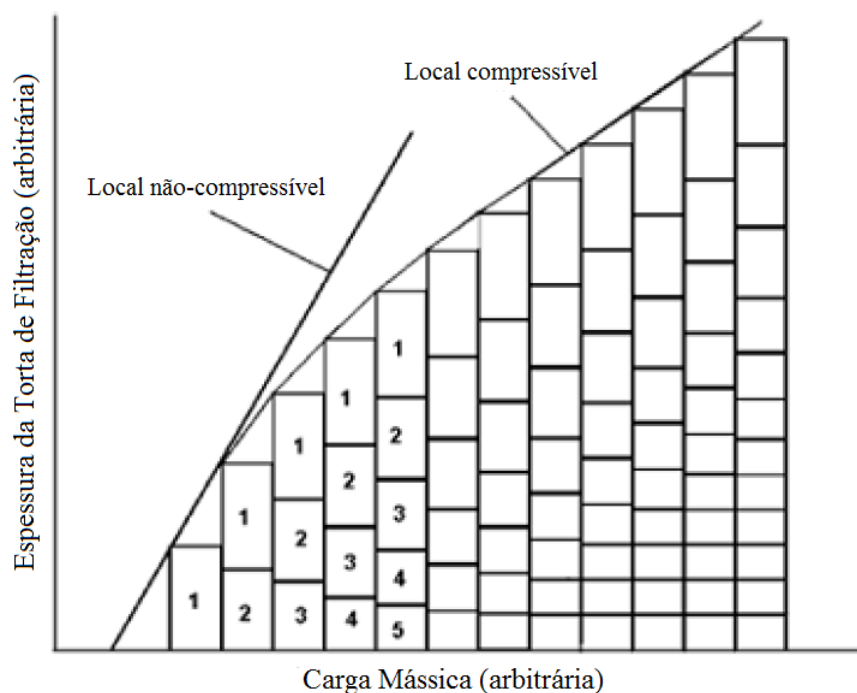


Figura 2.14 – Redução da espessura da torta pelo efeito da compressão (FARGNOLI, 2010).

2.4.7 Mecanismos de Coleta

A coleta das partículas pelas fibras do meio filtrante acontece mediante alguns mecanismos de captura. A Figura 2.15 mostra um esquema dos mecanismos de coleta.

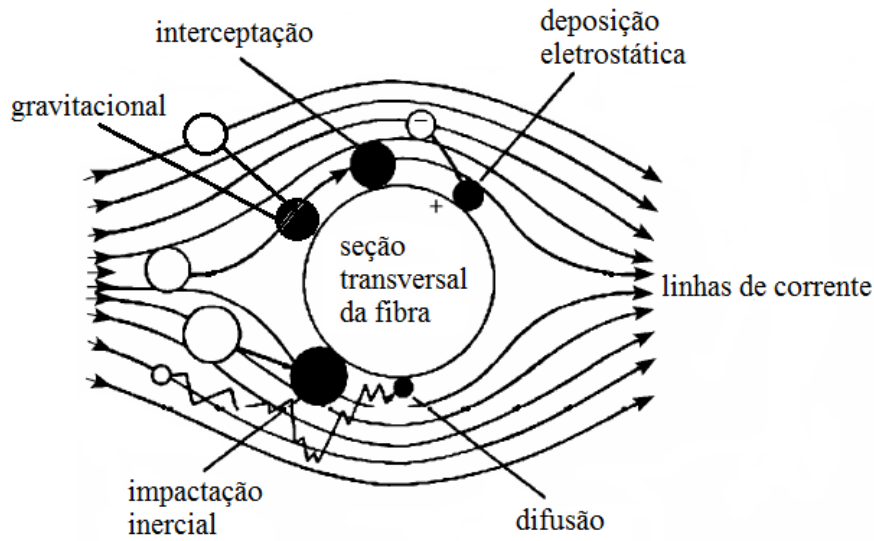


Figura 2.15 – Mecanismos de Coleta (YANG, 2012).

2.4.7.1 Difusão Browniana

A coleta ocorre quando partículas pequenas, em movimento aleatório, colidem com as fibras do meio filtrante. A redução da velocidade do gás aumenta a eficiência de coleta, uma vez que o tempo de permanência no meio filtrante é maior.

O modelo Stheckina e Fuchs (1966), na Equação (2.14), e o modelo de Lee e Liu (1982), Equação (2.15), *apud* Steffens (2007), foram desenvolvidos de acordo com a teoria da fibra individual, na qual não há negligência do efeito das fibras adjacentes, sugerem o cálculo da eficiência de coleta do mecanismo browniano.

$$\eta_d = 2,9Ku^{1/3}Pe^{-2/3} \quad (2.14)$$

$$\eta_d = 2,6\left(\frac{\varepsilon}{Ku}\right)^{1/3}Pe^{2/3} \quad (2.15)$$

Nas Equações (2.14) e (2.15) Ku é o coeficiente hidrodinâmico de *Kuwabara* e Pe é o número de *Peclet*, representados conforme as Equações (2.16) e (2.17).

$$Ku = \frac{-\ln(1-\varepsilon)}{2} - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{(1-\varepsilon)^2}{4} \quad (2.16)$$

$$Pe = \frac{v_f d_f}{D} \quad (2.17)$$

Na Equação (2.17), v_f corresponde à velocidade de filtração, d_f é o diâmetro da fibra e D é o coeficiente de difusividade, estimado a partir da equação de *Stokes-Einstein*, correspondendo, para uma partícula esférica de diâmetro d_p , a:

$$D = \frac{K_B T C}{3\pi\mu d_p} \quad (2.18)$$

na qual K_B é a constante de *Boltzmann*, T é a temperatura absoluta, μ é a viscosidade do gás de arraste e C é o fator de escorregamento de *Cunningham*, que corrige a descontinuidade do meio.

2.4.7.2 Impactação Inercial

A partícula transportada pelo gás de arraste segue sua linha de corrente. No entanto, o aumento do tamanho da partícula diminui sua capacidade de acompanhar a linha de fluxo. Então, por inércia, a partícula é coletada na fibra.

A eficiência de coleta por impactação inercial é dada pela Equação (2.19), proposta por Friedlander e Pasceri *apud* Steffens (2007):

$$\eta_i = \frac{St^3}{St^3 + 0,77St^2 + 0,22} \quad (2.19)$$

O número de *Stokes* é dado pela Equação (2.20), na qual μ corresponde à viscosidade do gás de arraste, C é o fator de escorregamento de *Cunningham*, v_f é a velocidade de filtração e d_f é o diâmetro da fibra.

$$St = \frac{\rho_p d_p^2 C v_f}{18\mu d_f} \quad (2.20)$$

2.4.7.3 Gravidade

A força gravitacional provoca o desvio de trajetória das partículas, que são capturadas ao entrarem em contato com a fibra. Esse mecanismo de coleta é dominante para baixas velocidades do gás e grandes partículas ($St > 10$). A eficiência de coleta por esse mecanismo é dada pela Equação (2.21), proposta por Tardos e Pfeffer (1980), *apud* STEFFENS (2007):

$$\eta_g = GaSt \quad (2.21)$$

Ga é o número de Galileu, conforme a Equação (2.22) e g , a aceleração da gravidade.

$$Ga = \frac{d_f g}{v_f^2} \quad (2.22)$$

2.4.7.4 Interceptação Direta

A coleta acontece quando a trajetória da partícula a leva para uma distância muito próxima da fibra. Se o centro de massa da partícula passar a uma distância menor que $d_p/2$ da superfície do coletor, ela será capturada. A coleta depende das propriedades do fluido e da razão entre o diâmetro da partícula e o diâmetro do coletor, conforme a Equação (2.23):

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (2.23)$$

A eficiência de coleta por interceptação direta é dada pela Equação (2.24), proposta por Lee e Liu (1982), na qual Ku é o coeficiente hidrodinâmico de Kuwabara.

$$\eta_{id} = \left(\frac{\varepsilon}{Ku} \right)^{1/3} \frac{R^2}{(1+R)} \quad (2.24)$$

2.4.7.5 Mecanismo Eletroforético

É quando a coleta é devida à atração eletrostática entre as partículas e as fibras que, por causa dos atritos provenientes do processo de filtração, ficam eletricamente carregadas. Tais forças podem proporcionar o aumento da eficiência de coleta (ZHOO *et al.*, 1990, *apud* STEFFENS, 2007), levando à formação de tortas menos compactas, que oferecem menor resistência ao escoamento do gás. Os principais mecanismos pelos quais se dá a coleta eletrostática são (COURY, 1986):

- Atração entre partículas e coletores carregados, com cargas opostas (coulômbico);
- Atração entre partícula carregada e um dipolo induzido no coletor globalmente neutro.

A eficiência teórica do mecanismo de coleta eletrostática foi estimada por Coury (1983) conforme a Equação (2.25). Considerando-se a partícula carregada com carga q , $St < 0,005$ e $10^{-4} < K_M < 10^{-6}$, tem-se:

$$\eta_e = 8,24 K_M^{0,5} \quad (2.25)$$

na qual K_M é o parâmetro adimensional do mecanismo dipolo imagem, sendo dado pela Equação (2.26):

$$K_M = \frac{\gamma_c C_c q^2}{3\pi\epsilon_0 d_p d_f^2 v_f} \quad (2.26)$$

sendo ϵ_0 a permissividade do vácuo ($\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m) e γ_c , o coeficiente de polarização do coletor, dado pela Equação (2.27), na qual ϵ_c é a constante dielétrica da partícula e ϵ_f é a constante dielétrica do fluido.

$$\gamma_c = \frac{\epsilon_c - \epsilon_f}{\epsilon_c + 2\epsilon_f} \quad (2.27)$$

2.4.7.6 Eficiência Total de Coleta

A Figura 2.16 mostra a eficiência correspondente a cada mecanismo e a eficiência total, para um filtro com espessura de 1 mm, densidade de empacotamento de 0,05, diâmetro de fibras de 2,0 μm e velocidade de 10 cm/s, conforme a teoria de captura por fibra simples (RODRIGUES, 2006).

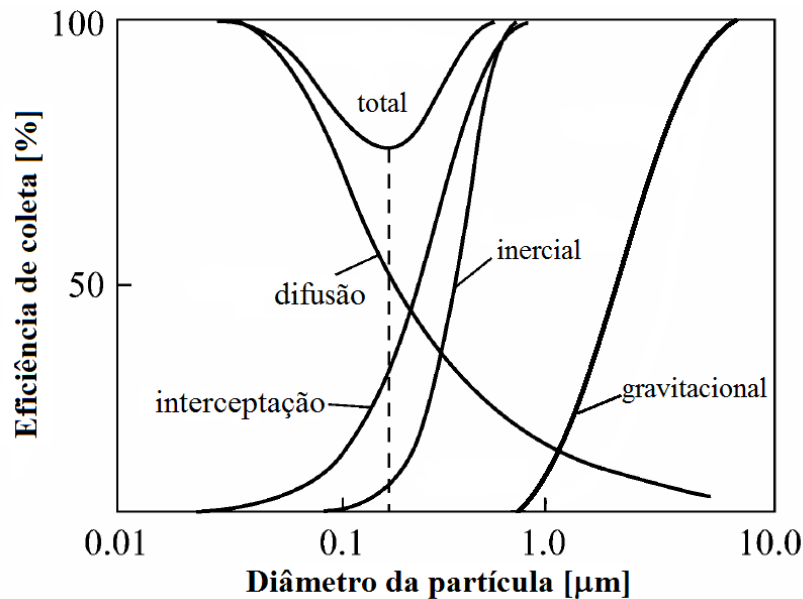


Figura 2.16 – Contribuição dos mecanismos de coleta na eficiência total de coleta (HINDS, 1999 *apud* YANG, 2012).

Pela análise da Figura 2.16, pode-se inferir que o aumento do diâmetro das partículas favorece a coleta por interceptação direta, impactação inercial e gravidade. Já o mecanismo de coleta por difusão Browniana prevalece quando há diminuição no diâmetro das partículas. Há regiões onde acontece a interação entre dois ou mais mecanismos de captura, regiões nas quais, segundo Lee (1986), a eficiência de coleta é mínima, uma vez que há maior penetração das partículas através do meio filtrante.

A eficiência total de coleta das partículas é admitida como sendo a contribuição de todos os mecanismos, conforme a Equação (2.28), conforme Steffens (2007):

$$\eta_T = \eta_d + \eta_i + \eta_g + \eta_{id} + \eta_e \quad (2.28)$$

2.5 Força de Adesão

O conhecimento da força de adesão entre as partículas e o meio filtrante é fundamental para a determinação do método de remoção da torta de filtração. Para remover a torta do tecido filtrante é necessária a aplicação de uma força maior que a força que liga a torta ao tecido (DENNIS; WILDER, 1975 *apud* MOREIRA 1998).

Vários fatores podem influenciar a adesão partícula-partícula e partícula-tecido, dentre os quais pode-se citar:

- reações químicas – prejudicam a remoção da torta formada em filtros de tecido;
- forças eletrostáticas – levam à formação de tortas menos compactas, que oferecem menor resistência ao gás de arraste, proporcionando aumento na eficiência de filtração; no entanto, sua ordem de grandeza é menor que as forças de Van der Waals, exercendo pouca influência na força de adesão em filtros de manga;
- capilaridade – não tem sido estudada para o caso da filtração de pós secos, pois em sistemas com umidade relativa menor que 60%, os efeitos das tensões superficiais são desprezíveis;
- forças de Van der Waals – são as forças de adesão predominantes nos sistemas de filtração em filtros de tecido.

As forças de Van der Waals surgem em decorrência do movimento aleatório dos elétrons, os quais produzem áreas transitórias de cargas concentradas chamadas dipolos (RUMPF, 1977 *apud* FELICETTI 2008). Essas forças são inversamente proporcionais à

distância de separação entre as partículas. Hamaker (1937) propôs uma expressão para o cálculo das forças de Van der Waals entre duas esferas de diâmetros d_1 e d_2 , conforme a Equação (2.29), na qual a é a distância entre as duas superfícies e H é a constante de Hamaker, cuja ordem de grandeza é de 10 a 20×10^{-19} Joules.

$$F_w = \frac{H}{12a^2} \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right) \quad (2.29)$$

Conhecendo-se a força de adesão entre as partículas, a distância de separação efetiva entre duas superfícies pode ser calculada pelo uso da Equação (2.30), conforme visto em Faustino (2010), em cujo trabalho a força de adesão entre partícula e substrato foi calculada por meio da técnica centrífuga.

$$a = \sqrt{\frac{Hd_p}{12F_c}} \quad (2.30)$$

Na Tabela 2.5 são apresentados os valores de a calculados por Faustino (2010), para partículas de concentrado fosfático aderidas em membrana de éster de celulose e, também, partículas de concentrado fosfático aderidas em filtro de papel de celulose, usando a Equação (2.30).

Tabela 2.5 – Valores de distância efetiva (a) entre partícula e substrato, calculados pela Equação (2.30) (FAUSTINO, 2010).

Substrato	Velocidade angular de compressão (rpm)	Diâmetro médio das partículas $\times 10^6$ (m)	Distância de separação efetiva $\times 10^9$ (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
		61,81	0,76
	1000	15,45	0,85
		24,71	0,51
		50,50	0,45

Existem duas teorias clássicas na literatura usadas para determinar a força de adesão entre as partículas em um aglomerado: a Teoria de Rumpf (1962) e a Teoria de Kendall *et al.* (1986), *apud* Moreira (1998).

Segundo Rumpf (1962), a tensão normal (σ^*) aplicada a um aglomerado de partículas de diâmetro d_p é dada pela Equação (2.31), na qual 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, dado pela Equação (2.32).

$$\sigma^* = nF \quad (2.31)$$

$$n = 1,1(1 - \varepsilon)\varepsilon^{-1}d_p^{-2} \quad (2.32)$$

Para o caso de duas esferas de mesmo diâmetro, em aglomerados secos e inertes, a Equação (2.29), que dá a força de adesão entre as partículas, pode ser reescrita de acordo com a Equação (2.33).

$$F_W = \frac{H}{24a^2}d_p \quad (2.33)$$

Substituindo-se a Equação (2.33) na Equação (2.31), tem-se a tensão de ruptura do aglomerado (σ_{R-R}^*), dada pela Equação (2.34).

$$\sigma_{R-R}^* = 0,046 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \frac{H}{d_p a^2} \quad (2.34)$$

Segundo Kendall *et al.* (1986), a equação que dá o número médio de contatos partícula-partícula por unidade de área é análoga à ruptura de materiais cristalinos, conforme a Equação (2.35).

$$n = 13,3(1 - \varepsilon)^4 d_p^{-2} \quad (2.35)$$

Então, a tensão de ruptura do aglomerado (σ_{R-K}^*) pode ser calculada pela Equação (2.36).

$$\sigma_{R-K}^* = 0,554(1 - \varepsilon)^4 \frac{H}{d_p a^2} \quad (2.36)$$

2.5.1 Metodologia de Seville *et al.* (1989)

O método proposto por Seville *et al.* (1989) para estimar a força de remoção da torta, sugere que o escoamento do gás no sentido reverso ao da filtração, até atingir as condições críticas de desprendimento da torta, proporciona um comportamento similar ao da filtração. Adotando-se a hipótese de que a ruptura da torta se dá na interface torta-tecido (MOREIRA, 1998), tem-se que a Equação (2.10) pode ser reescrita na forma da Equação (2.37), na qual ΔP_L é a queda de pressão na limpeza, k_l é a resistência específica do meio filtrante, v_c é a velocidade do gás na limpeza, ΔP_{cL} é a queda de pressão na torta nas condições críticas de remoção, na limpeza.

$$\Delta P_L = k_l v_c + \Delta P_{cL} \quad (2.37)$$

Foi definida uma grandeza chamada de fração de massa retida na torta (γ), definida pela Equação (2.38), na qual W_R é a massa retida no tecido após uma determinada velocidade de limpeza, e W é a massa total da torta formada sobre o meio filtrante.

$$\gamma = \frac{W_R}{W} \quad (2.38)$$

O método de Seville *et al.* (1989) consiste no cálculo da fração mássica retida (γ) após cada limpeza efetuada no meio filtrante. Numa primeira etapa, os valores de γ são, então, plotados em relação a cada velocidade de limpeza (v_c) utilizada para a remoção da torta. No gráfico de $\gamma \times v_c$, acontece a interpolação para encontrar-se valores de fração de massa retida correspondentes a outras velocidades de limpeza. Os valores encontrados são dispostos em tabelas. Na segunda etapa do tratamento, os valores de fração de massa retida (γ) calculados são dispostos em forma gráfica, em relação à queda de pressão na limpeza (ΔP_L). O mesmo procedimento de interpolação de valores é realizado, obtendo-se valores de γ correspondentes a outras quedas de pressão na limpeza. A Figura 2.17 mostra um exemplo das duas primeiras etapas propostas por Seville *et al.* (1989).

Em seguida, na terceira etapa, plota-se os valores encontrados por interpolação nas etapas anteriores, construindo-se um gráfico de velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L). Foi utilizada a técnica de regressão linear nos valores dispostos em forma gráfica, conforme pode ser observado na Figura 2.18, a qual apresenta o exemplo da terceira etapa do tratamento proposta por Seville *et al.* (1989).

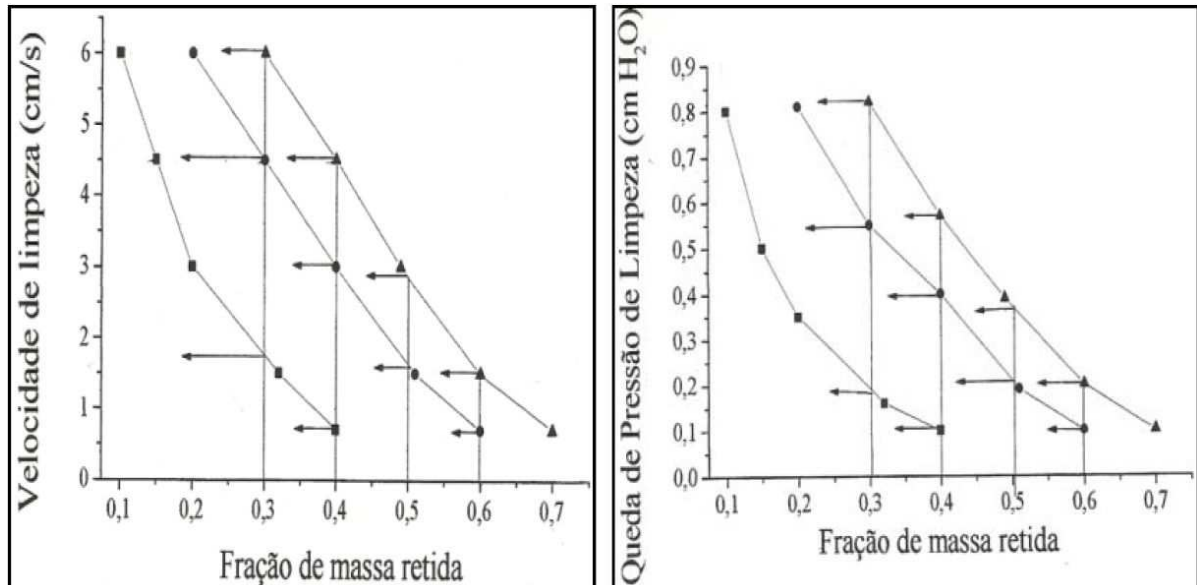


Figura 2.17 – Demonstração da primeira e segunda etapa propostas por Seville *et al.* (1989) *apud* BARROS (2010).

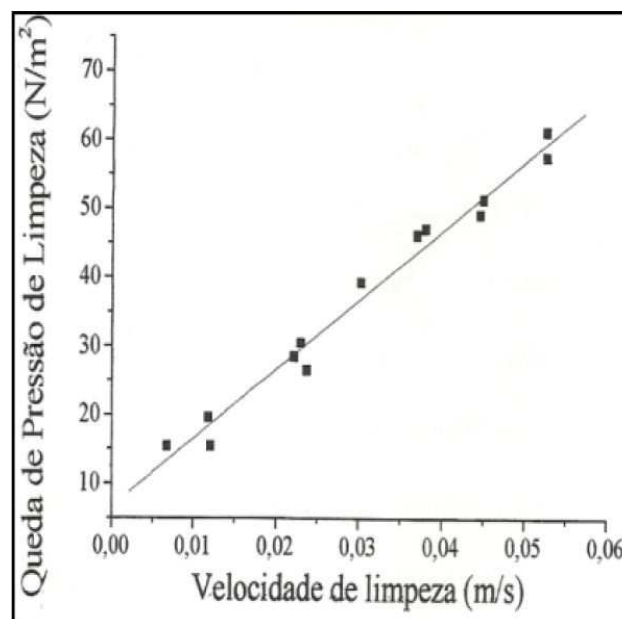


Figura 2.18 – Demonstração da terceira etapa proposta por Seville *et al.* (1989), para o cálculo da força de adesão *apud* BARROS (2010).

Através da Figura 2.18, observa-se que, conforme a Equação (2.37), a queda de pressão na limpeza varia linearmente com a velocidade de limpeza. O coeficiente linear dessa reta representa a queda de pressão na torta, na limpeza, e, o coeficiente angular, a resistência específica do meio filtrante. A tensão de remoção entre a torta e o tecido é definida como a força de adesão por unidade de área.

Tem-se, então, que o coeficiente linear da reta (ΔP_{cL}) corresponde à tensão de remoção da torta de filtração (σ_R).

A força de adesão pode ser calculada pela Equação (2.39), na qual F_c é a força de adesão entre a torta e o tecido e A corresponde à área de filtração.

$$F_c = \sigma_R A \quad (2.39)$$

2.5.2 Remoção da Torta de Filtração por Vibração Mecânica

Alguns pesquisadores desenvolveram trabalhos sobre esse tema. No entanto, é importante destacar que cada resultado encontrado tem aplicabilidade específica às condições dos sistemas estudados.

Leith e Allen (1986) calcularam a aceleração (a^*) desenvolvida pelo motor submetendo o meio filtrante a uma vibração de frequência f e amplitude d , conforme é visto na Equação (2.40).

$$a^* = 4\pi^2 f^2 d \quad (2.40)$$

Assim, a força F_v que atua sobre o elemento de torta situado sobre esse meio filtrante é dada pela equação (2.41), na qual W é a massa de pó acumulada por unidade de área (A).

$$F_v = 4WA\pi^2 f^2 d \quad (2.41)$$

Dennis *et al.* *apud* Moreira (1998) propôs uma correlação empírica em que a fração da superfície de filtração que é limpa, a_c , relaciona-se às condições de vibração mecânica pela Equação (2.42).

$$a_c = 2,23 \cdot 10^{-2} (f^2 d A W)^{2,52} \quad (2.42)$$

Dennis (1974) verificou que a remoção de pó por vibração mecânica, durante a limpeza do filtro, sofre forte influência da aceleração, aproximadamente $(a^*)^2$, para acelerações menores que $4g$. Para acelerações maiores, a dependência é mais fraca, sendo em torno de $(a^*)^{1/2}$.

2.6 Adimensional de Euler

O número de Euler, também conhecido como coeficiente de pressão, é um número adimensional, dado pela Equação (2.43).

$$Eu = \frac{2\Delta P}{\rho u_c^2} \quad (2.43)$$

O número de Euler fornece a relação entre a queda de pressão e a energia cinética. Na aplicação nos processos de filtração, pode-se considerar que a queda de pressão, ΔP , é definida como a diferença entre a pressão a jusante do filtro e a pressão a montante do filtro. A velocidade média do fluido, u_c , no caso do processo de filtração, corresponde à velocidade de arraste do gás, v_f .

Quanto maior o número de Euler, maiores serão as necessidades energéticas do processo (RODRIGUES, 2001).

2.7 Revisão da Literatura

Vários pesquisadores têm proporcionado o desenvolvimento de um vasto contingente de trabalhos na área de filtração de gases. Pode-se classificar os estudos em três linhas de desenvolvimento, as quais estão interligadas entre si:

- Ciência da Filtração – nessa linha, encontram-se os trabalhos que focam no estudo da formação e limpeza da torta e dos meios filtrantes, bem como no conhecimento das influências dos vários parâmetros de projeto dos sistemas convencionais, como a velocidade de filtração, a queda de pressão e o tempo de filtração, por exemplo.
- Tecnologia dos Sistemas de Filtração – nessa linha concentram-se os trabalhos que propõem alterações nas linhas convencionais de limpeza de gases, agregando ao sistema tradicional equipamentos para aumentar a eficiência da separação das partículas e diminuir as necessidades energéticas do processo, por exemplo. Também há trabalhos que avaliam o uso de nanofibras nos tecidos de filtração, além de investigações sobre a filtração de nanopartículas.
- Modelagem e Simulação Aplicadas ao Sistema de Filtração – essa vertente prioriza os estudos que utilizam parâmetros teóricos para prever o comportamento do

sistema de filtração em condições experimentais ainda não avaliadas, ou difíceis de serem controladas e reproduzidas.

Segue-se uma exposição sucinta de alguns trabalhos atuais desenvolvidos nessas três linhas de pesquisa, durante a última década.

2.7.1 Ciência da Filtração

Freitas *et al.* (2004) avaliaram a influência do diâmetro de partícula na eficiência de coleta, na filtração de aerossóis em altas temperaturas utilizando filtros cerâmicos de dupla camada. Os resultados mostraram que a eficiência diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o diâmetro da partícula.

Müller *et al.* (2006) estudaram filtros cerâmicos na filtração de gases em altas temperaturas. Os valores obtidos para a permeabilidade darciana, K_{Darcy} , dos meios filtrantes, estão na ordem de grandeza esperada para filtros de gases, apresentando assim grande potencial para aplicações industriais.

Chen e Hsiau (2009) estudaram a influência da velocidade superficial na formação e na compressão da torta de filtração. Verificou-se que a compressão da torta aumenta com o aumento da velocidade superficial de filtração. Os resultados mostraram que a porosidade da torta diminuiu e a resistência específica da torta e o rendimento de coleta aumentou com o aumento da tensão de compressão. Os resultados do teste deste estudo podem ser aplicados em sistemas diferentes de filtros durante a filtração de fluxo cruzado.

Cezar *et al.* (2009) realizaram um estudo da remoção de tortas de filtração de gases para pó orgânico. Os resultados mostraram que a força de adesão não sofreu influência da quantidade de pó depositado no filtro.

Matugi *et al.* (2009) investigaram a porosidade das tortas de filtração de gases ao longo do tempo, visando tornar o procedimento de formação e de deposição de partículas finas no meio filtrante mais bem compreendidos, possibilitando, assim, o projeto de filtros mais eficientes e econômicos. Concluiu-se que a porosidade diminuiu com o tempo de filtração, mas a porosidade média diminuiu e volta a aumentar com o tempo.

Saleem *et al.* (2012) avaliaram os efeitos das condições operacionais nos parâmetro de resistência do meio filtrante e de tortas de calcário formadas sob feltros agulhados

uniformemente carregados, em teste de unidade piloto. Os resultados revelam que a resistência específica do meio filtrante é independente da velocidade enquanto que a resistência específica da torta de filtração aumenta linearmente com a velocidade de filtração. A resistência da torta de filtração diminui com o aumento da queda de pressão.

Kurtz *et al.* (2012) ao compararem os filtros manga com os equipamentos de teste em escala de laboratório, descobriram que há grandes diferenças de funcionamento e comportamento de filtração. Parâmetros não ajustados na operação das unidades de filtração contribuem para estas diferenças, bem como as sistemáticas diferenças de concepção. As unidades de filtração diferem na confecção do filtro, na distribuição de filtro, espessura da torta, nos fluxos de volume continuamente variáveis e desvios diversos nas condições de limpeza.

Lohrengel *et al.* (2012) estudaram a eficiência de filtração com altas velocidades superficiais de filtração. O problema é que as altas velocidades nominais do filtro provocam furos e outros defeitos estruturais na torta de filtração. Isto conduz a maiores concentrações de gás limpo.

Ginestet e Pugnet (2012) estudaram a emissão de partículas em filtro de tecido industrial após a limpeza por jato pulsante, chegando à conclusão de que, quando a pressão do ar comprimido é aumentada, a queda de pressão residual (após a limpeza) do filtro de tecido de jato pulsante é reduzida, mas as emissões de partículas aumentam. A configuração do jato de pressão deve ser cuidadosamente escolhida, a fim de encontrar o melhor ‘acordo’.

Tanabe *et al.* (2012) avaliaram a eficiência de filtros de polipropileno e celulose na filtração de gás a altas pressões, concluindo que o aumento da pressão do sistema causou um aumento na porosidade, reduzindo a resistência da torta de filtração ao fluxo de gás para ambos os filtros.

Mahdi e Holdich (2013) utilizaram de testes de laboratório a pressão constante. Os resultados demonstraram que a velocidade de filtração constante é um método mais confiável para aquisição de dados, especialmente quando há a determinação da resistência do meio filtrante, e os equipamentos de laboratório disponíveis são adequados para uso.

2.7.2 Tecnologia dos Sistemas de Filtração

Tanthapanichakoon *et al.* (2008) investigaram a remoção de partículas menores do que 2,5 μm (PM 2.5) dos gases de escape de alta temperatura através de um filtro cerâmico de vela dupla. A dinâmica de fluidos computacional (CFD) foi usada para simular o comportamento do fluxo de gás. Os resultados da simulação obtidos foram validados com dados experimentais disponíveis.

Shaaban (2011) realizou a otimização numérica e a investigação experimental do desempenho aerodinâmico de um separador gás-sólido de três estágios: a primeira fase do separador é uma câmara de decantação, que é concebida para recolher partículas grosseiras (partículas com o diâmetro de partícula abaixo de 100 μm); a segunda fase é um separador ciclone, onde a média de partículas finas (partículas com o diâmetro de partícula de até 15 μm) devem ser recolhidos; as partículas que escapam do separador ciclone são coletados na terceira fase, que é um filtro de manga. A simulação em CFD é utilizada a fim de otimizar o desempenho do separador aerodinâmico e reduzir o tamanho do separador. A comparação entre os resultados de CFD no ponto de projeto e a medida de queda de pressão total no separador mostra uma boa concordância.

Sharma *et al.* (2012) estudaram as vantagens e aplicações possíveis de um novo sistema de filtração sem pulso, descrevendo um novo conceito de filtração sem pulso e comparando seu desempenho com o sistema convencional de filtração pulsante. Esse sistema utiliza um jato de ejetor em linha para criar uma velocidade de cisalhamento muito alta na superfície do filtro, para controlar a espessura da torta e permitir contínua infiltração de gás através do filtro. A força de cisalhamento na superfície do filtro mantém as partículas de cinzas em suspensão e mantém uma queda de pressão mais baixa ao longo do filtro. Esses recursos garantem uma tensão de ruptura mínima do elemento de filtro e, também, a filtração através de uma persistente camada de pó sobre a superfície do filtro.

Michalski *et al.* (2012) avaliaram a estrutura característica, bem como a queda de pressão e de eficiência de remoção de partículas de aerossol de sílica. O efeito de diâmetro de fibra sobre a profundidade de penetração de partículas e entupimento do filtro durante a filtração foi investigado com a tomografia de raios-X. Os resultados indicam que as nanofibras aumentam a eficiência do filtro.

Popovici e Gasparin (2012) estudaram um novo dispositivo para realizar medidas *in situ* em testes em meios filtrantes em plantas com jato pulsante. O desafio era instalar um bom dispositivo de limpeza sobre as mangas para implementar o equipamento de medição para a temperatura, queda de pressão, o fluxo de volume e as emissões de partículas.

Wang *et al.* (2013) estudaram a caracterização, medição e emissão de nanopartículas; avaliaram também a exposição às nanopartículas nos locais de trabalho, estudando condições de controle e redução de liberação de nanopartículas usando a tecnologia de filtração.

2.7.3 Modelagem e Simulação Aplicadas ao Sistema de Filtração

Jeon e Jung (2004) desenvolveram um método de simulação para investigar o comportamento de compactação de tortas de poeira. Considera-se o efeito do tamanho de partícula sobre o comportamento de compressão de tortas de poeira compostas de aerossóis monodispersos para desenvolver o método de simulação em um caso mais geral, mas complexo de tortas de filtração usando aerossóis polidispersos. Os resultados de simulação mostram claramente que o atrito de aderência e as forças de compressão que atuam sobre uma partícula desempenham um papel importante na determinação do comportamento de compactação das tortas de poeira. Da mesma forma, as partículas menores tendem a causar uma maior queda de pressão através das tortas de poeira compostas de aerossóis monodispersos na mesma extensão de deposição em densidade de partículas, em área e massa.

Deuschle *et al.* (2008) apresentaram um modelo CFD validado experimentalmente que descrevia a regeneração de filtração e os efeitos de rearranjo de depósito em um sistema de filtro de gás. O modelo CFD serviu para investigar o comportamento a longo prazo de um sistema de filtro de gás, por exemplo um filtro de partículas diesel, no que diz respeito ao aumento permanente da pressão causada pelas deposições de inertes acumulados no interior do filtro em sistemas com o tempo de operação persistente. O modelo de simulação pôde também ser aplicado para filtros de gases de outras geometrias do sistema. Canais de filtro com áreas de secção transversal que mudaram ao longo do comprimento do filtro também puderam ser investigados. Além disso, o modelo de simulação pode ser estendido para simular um catalisador revestido por um filtro de gás com sistema de otimização e regeneração do filtro.

Endo *et al.* (2009) investigaram, teórica e experimentalmente, a resistência de permeação do fluido através de um leito ‘empacotado’ de partículas, com uma estrutura não uniforme, para confirmar a relação entre a queda de pressão e taxa de fluxo de ar. Uma analogia com um circuito elétrico de rede foi utilizada para expressar o modelo teórico do leito, no qual o fluido permeava de uma maneira zigue-zague entre as partículas no leito. Os resultados mostraram boa concordância entre o modelo teórico e os dados experimentais. Os resultados também verificaram que o fluxo de fluido era irregular em todas as direções quando se utilizava a estrutura não uniforme. Os resultados sugerem que a analogia de rede elétrica de resistência pode ser útil para resolver o problema da permeação de fluido em camadas de partículas reais com estruturas não uniformes.

Joubert *et al.* (2011) estudaram a modelagem da variação na queda de pressão através de um filtro HEPA durante a filtração na torta na presença de umidade. Um modelo semi-empírico foi desenvolvido, o qual considera a queda de pressão ao longo do filtro entupido como a soma das quedas de pressão através do filtro limpo e através da torta, que é em si decomposta em várias camadas sucessivas. A queda de pressão através de cada camada de partículas depende de seu estado de equilíbrio com a umidade do ar. O modelo inclui a resistência específica de cada camada de partículas e a sua variação quando a torta é exposta a um fluxo de ar úmido.

Ström *et al.* (2011) propuseram um modelo para simulações multifásicas em sistemas gás-sólidos. Tal modelo é capaz de lidar corretamente com a interceptação partícula-partícula. O modelo é destinado para baixos números de Reynolds do fluxo de partículas, e pode ser aplicado para resolver grandes detalhes nos fenômenos em um grande número de aplicações industriais (tais como filtração de partículas finas em meios porosos).

Qian *et al.* (2012) estudaram o efeito do arranjo da manga na eficiência de remoção de tortas em filtros de manga. O fluxo gás-sólido de duas fases e os desempenhos de despoeiramento do filtro de manga com diferentes modos de arranjo foram simulados por meio da tecnologia da dinâmica computacional de fluidos (CFD), e o efeito do modo de disposição da manga no campo de fluxo, o coeficiente de distribuição de ar e a trajetória da partícula no filtro de manga foram analisados.

Hai-Ming *et al.* (2012) simularam a permeabilidade de fibras virtuais em 3D. Uma série de meios filtrantes tridimensionais de fibra virtual com diferentes frações de volume de sólido foi criada por algoritmo aleatório para obter a permeabilidade de filtro de fibra real.

Rief *et al.* (2012) realizaram uma abordagem computacional sobre a deformação na mudança das propriedades de filtração do tecido. Foram desenvolvidos modelos, algoritmos e implementações de *softwares* relacionados para a geração de estrutura virtual, análise da estrutura geométrica, a dinâmica de fluidos e mecânica dos sólidos, com todos os métodos operando na microestrutura dos meios filtrantes.

O presente capítulo apresentou os principais trabalhos relacionados ao tema. Na sequência serão apresentadas as metodologias e materiais utilizados para o desenvolvimento dos testes experimentais.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E METODOLOGIA

Neste capítulo constam as especificações dos materiais utilizados na realização dos testes, bem como a descrição detalhada da metodologia empregada na execução dos mesmos.

3.1 Aparato Experimental

Os ensaios de filtração gás-sólido foram realizados no Laboratório de Separação de Partículas (LABSEP), da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

O aparato experimental utilizado na realização dos ensaios experimentais está representado na Figura 3.1. Por sua vez, a Figura 3.2 apresenta detalhes da câmara de alimentação, cujo material de construção é o acrílico.

As dimensões da câmara de acrílico eram: 62,5 cm de comprimento, 62,5 cm de largura e 80 cm de altura. A câmara de alimentação era bem vedada, a fim de evitar que entrasse ar com umidade. Portanto, havia uma luva de borracha que permitia o manuseio de materiais em seu interior. No suporte de madeira, ficavam fixadas duas colunas preenchidas com sílica gel, as quais recebiam ar proveniente do compressor e garantiam o abastecimento de fluido sem umidade para a câmara de alimentação. Também fixo ao suporte de madeira, tinha-se um filtro de ar, com válvulas que permitiam o controle da vazão do gás que entrava na câmara de alimentação e do ar que passava pelo Venturi. Dentro da câmara de alimentação havia um prato giratório e um psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido, composto por dois termômetros de mercúrio, com precisão de 1°C. A umidade do interior da câmara era medida usando-se os valores de temperatura medidos no psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido, através da carta psicrométrica (vide Anexo A).

A alimentação de material particulado ocorria nos sulcos circulares contidos no prato giratório (vide detalhe na Figura 3.2). O diâmetro do prato giratório era de 24,5 cm. O material particulado era, então, sugado pelo Venturi, e conduzido à câmara de filtração. O movimento giratório do prato era devido à propulsão de um motor com potência de 550 W, cuja velocidade de rotação era controlada por um inversor de frequência.

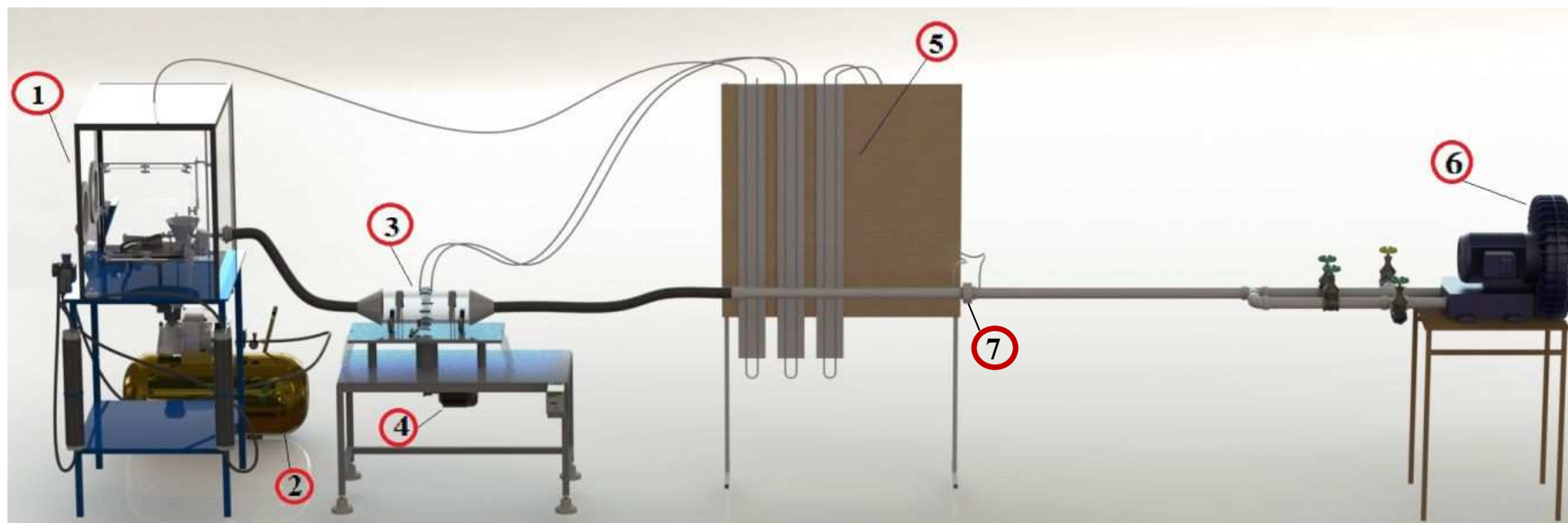


Figura 3.1 – Aparato experimental.

Legenda:

- 1 – câmara de alimentação;
- 2 – compressor de ar com 3680 W de potência;
- 3 – câmara de filtração;
- 4 – motor excêntrico com 243 W de potência;
- 5 – manômetros de tubo em U;
- 6 – soprador com 5520 W de potência.
- 7 – placa de orifício.

Na Figura 3.2 tem-se:

- 1 – inversor de frequência;
- 2 – filtro de ar;
- 3 – motor do prato giratório;
- 4 – prato giratório;
- 5 – colunas preenchidas com sílica gel.

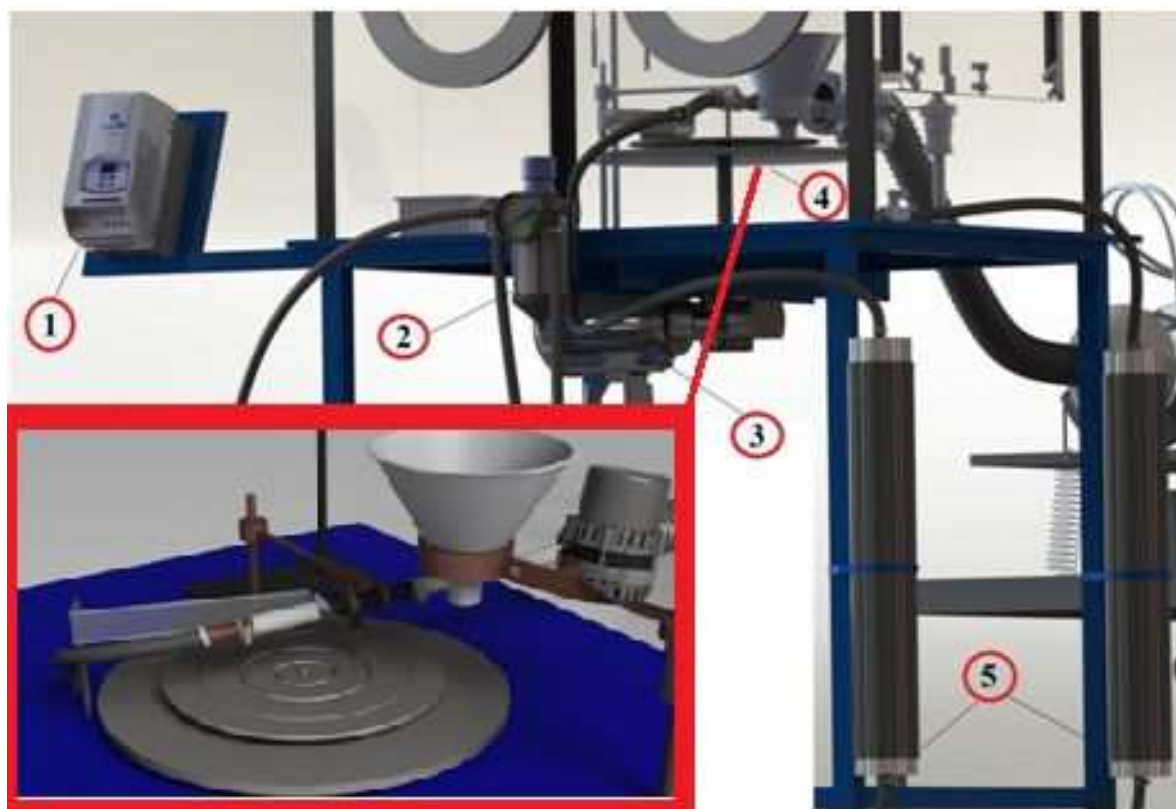


Figura 3.2 – Detalhes da câmara de alimentação.

A câmara de alimentação era conectada à câmara de filtração através de uma mangueira flexível, com diâmetro de 5 cm. A câmara de filtração foi feita de acrílico, sendo constituída de duas partes cilíndricas. O comprimento de cada parte cilíndrica era de 20,5 cm, sendo o comprimento total da parte cilíndrica do filtro de 41 cm. O meio filtrante era colocado perpendicular ao sentido do fluxo, entre as duas partes cilíndricas da câmara de filtração, sendo a área de filtração de $0,0153 \text{ m}^2$. A Figura 3.3 mostra a fotografia da câmara de filtração, na etapa de adaptação da unidade experimental, com um detalhe para o processo de acoplamento das duas partes cilíndricas da câmara de filtração, e dos conectores para a medida da pressão no meio filtrante. Foi adaptada uma válvula em uma das partes cilíndricas

da câmara de filtração, prevendo o seu uso em situações nas quais seria necessária a retirada de material particulado do sistema sem a interrupção do processo.

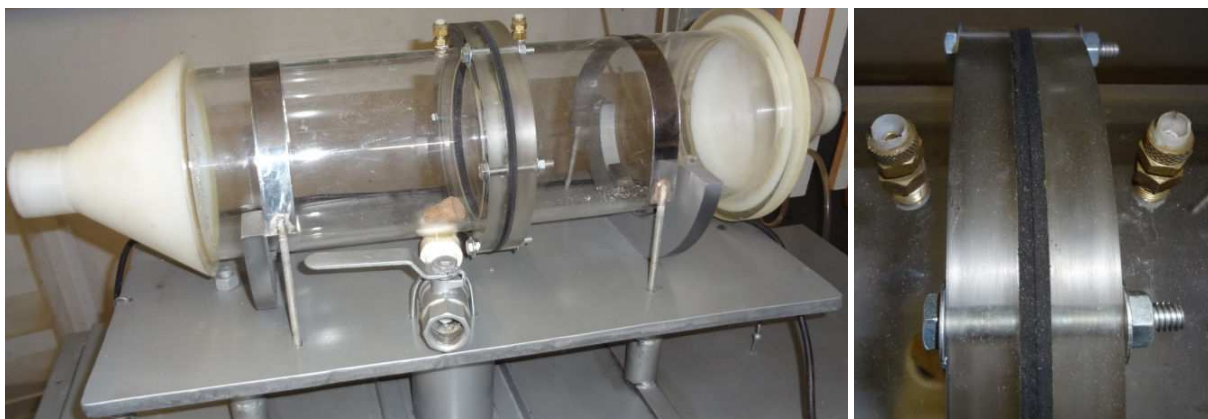


Figura 3.3 – Câmara de filtração, com detalhe do acoplamento das duas partes cilíndricas da câmara de filtração.

À bancada da câmara de filtração estava acoplado um motor excêntrico, responsável por imprimir vibração mecânica ao sistema de filtração. O acionamento do motor era feito por meio de um inversor de frequência, da marca *WEG*, série *CFW-10*. A Figura 3.4 mostra a bancada do filtro de acrílico, bem como o motor excêntrico acoplado ao sistema de filtração.

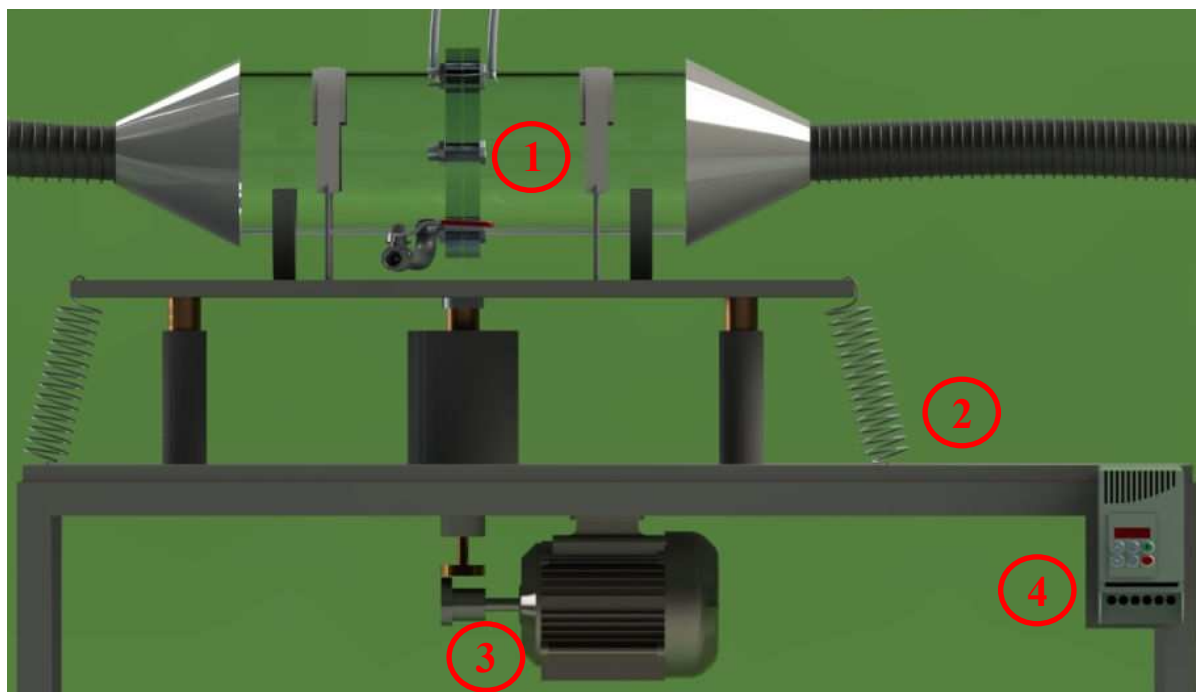


Figura 3.4 – Esquema da câmara de filtração (1), bancada (2), motor excêntrico (3) e inversor de frequência (4).

Para amortecer o movimento vibratório, foram colocadas molas nas laterais do suporte da câmara de filtração e também nos pés da bancada, conforme a Figura 3.5 (a). O acionamento do motor provocava uma propulsão na haste interior central do apoio, o que promovia um movimento oscilatório na direção vertical, no suporte da bancada e na câmara de filtração. A Figura 3.5 (b) mostra uma fotografia do contato dessa haste central na parte inferior do apoio do filtro. A Figura 3.5 (c) mostra uma fotografia do inversor de frequência que controlava a frequência de vibração do motor. A Figura 3.5 (d) mostra o contato entre o excêntrico do motor e a haste do eixo central do apoio, que recebia a propulsão do motor e provocava o movimento da câmara de filtração.

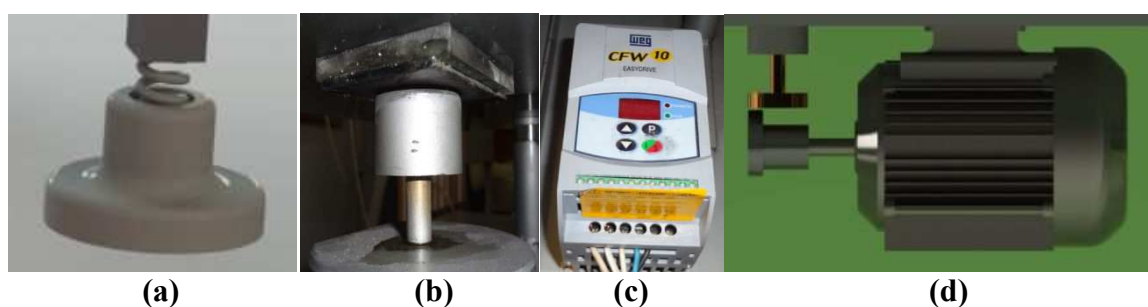


Figura 3.5 – Detalhes: pé da bancada (a); contato da haste do eixo central com o apoio da câmara de filtração (b); inversor de frequência do motor (c); vista do contato do eixo excêntrico do motor com a haste que recebe a propulsão do movimento do motor (d).

O soprador, do tipo *WEG Plus*, da marca *IBRAM*, era o equipamento responsável por garantir o fluxo de ar através da câmara de filtração, tanto para sugar o ar, na etapa de filtração, como para soprá-lo, na etapa de limpeza por escoamento reverso. A direção do fluxo de ar era controlada por meio do comando de quatro válvulas do tipo gaveta, conforme pode ser visto na Figura 3.6.

A velocidade do gás de arraste era controlada por meio da medida de queda de pressão na placa de orifício, previamente calibrada. A queda de pressão entre a montante e jusante da placa de orifício era obtida por meio dos manômetros em tubo em U, cujo fluido manométrico era água (Figura 3.1). A calibração foi feita usando-se uma placa de orifício com 8 mm de diâmetro para o fluxo de ar na filtração e uma placa com 10 mm de diâmetro para o fluxo de ar na limpeza da torta de filtração.

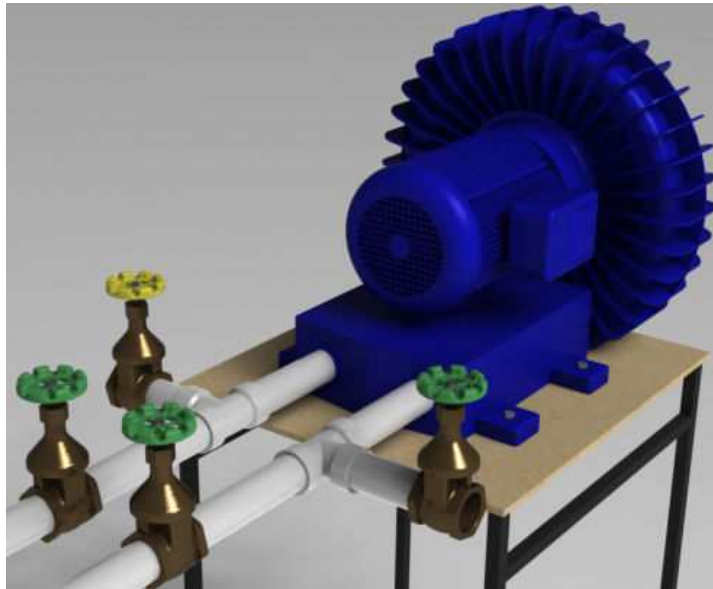


Figura 3.6 – Destaque do comando de válvulas e soprador.

Os demais equipamentos utilizados nos ensaios foram:

- Balança analítica com quatro casas de precisão, da marca *SHIMADZU*, modelo *AY220*;
- Estufa da marca *MedClave*, modelo 5;
- Dessecador de vidro;
- Cronômetro digital;
- Moinho de Bolas com 150 W de potência.

3.2 Material Particulado

Foram utilizados três tipos de materiais pulverulentos para a realização dos testes: rocha fosfática virgem, rocha fosfática moída e polvilho doce. Foram escolhidos esses três materiais com o intuito de se avaliar a influência da vibração em um sistema com filtração de partículas de diferentes diâmetros característicos (rocha moída e rocha virgem), e partículas com diferentes fatores de forma (rocha fosfática e polvilho doce).

A Figura 3.7 mostra a imagem da estrutura da rocha fosfática e do polvilho doce. As imagens foram obtidas no Laboratório Multiusuário de Microscopia da FEQUI/UFU por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca *Carl Zeiss*, modelo *EVO MA10*, utilizando o detector de elétrons secundários.

A análise da distribuição granulométrica dos materiais foi feita no equipamento *Malvern Mastersizer Microplus MAF 501*[®] do Laboratório de Caracterização de Partículas da FEQUI/UFU.

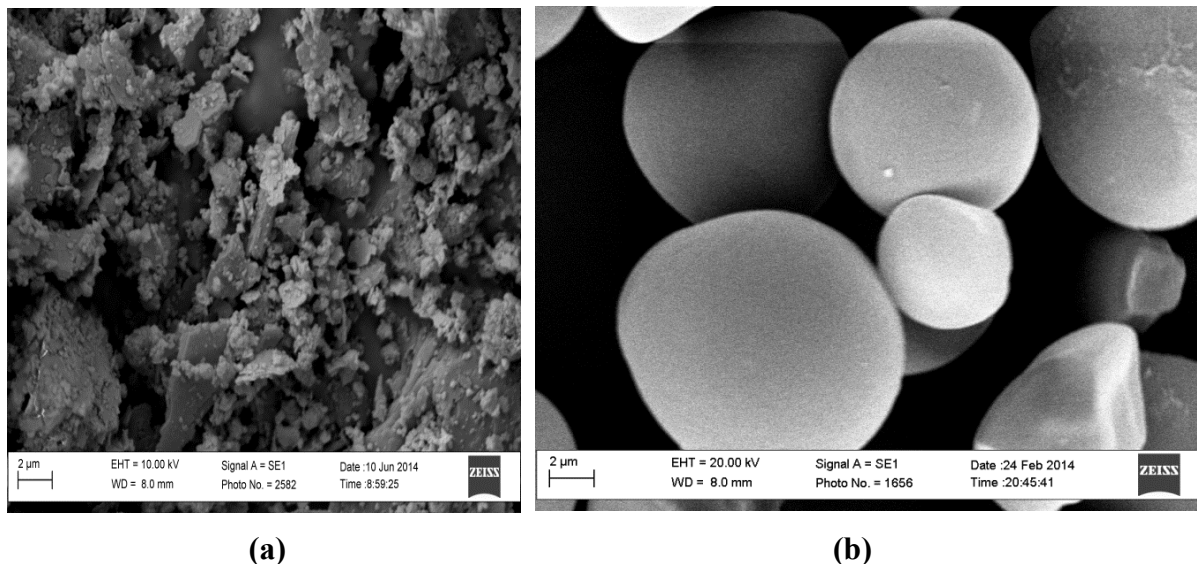


Figura 3.7 – Partículas de rocha fosfática (a) e polvilho doce (b) em imagens do MEV.

A rocha virgem foi disponibilizada pela empresa *FOSFÉRTIL – Fertilizantes Fosfatados S.A.*, da cidade de Patos de Minas (MG). No intuito de se obter outro material com as mesmas características, porém com menores diâmetros de partículas, realizou-se a moagem de parte da rocha virgem no Moinho de Bolas. A moagem foi feita em três etapas, utilizando-se a única rotação disponível no equipamento:

- 1º etapa: uma massa de pó virgem equivalente a três béqueres de 500 mL foi alimentada ao Moinho de Bolas; o processo de moagem nesta etapa durou 31 h e 30 min;
- 2º etapa: uma massa de pó virgem equivalente a dois béqueres de 500 mL foi alimentada ao Moinho de Bolas; o processo de moagem nesta etapa durou 25 h;
- 3 etapa: uma massa de pó virgem equivalente a três béqueres de 500 mL foi alimentada ao Moinho de Bolas; o processo de moagem nesta etapa durou 28 h e 30 min.

Ao final das três etapas, toda a massa de pó correspondente aos oito béqueres de 500 mL foi misturada, passou pelo quarteamento manual e foi reservada à parte, para ser utilizada nos ensaios.

A Figura 3.8 mostra a distribuição da rocha fosfática virgem e da rocha fosfática moída, conforme análise feita no *Mastersizer*.

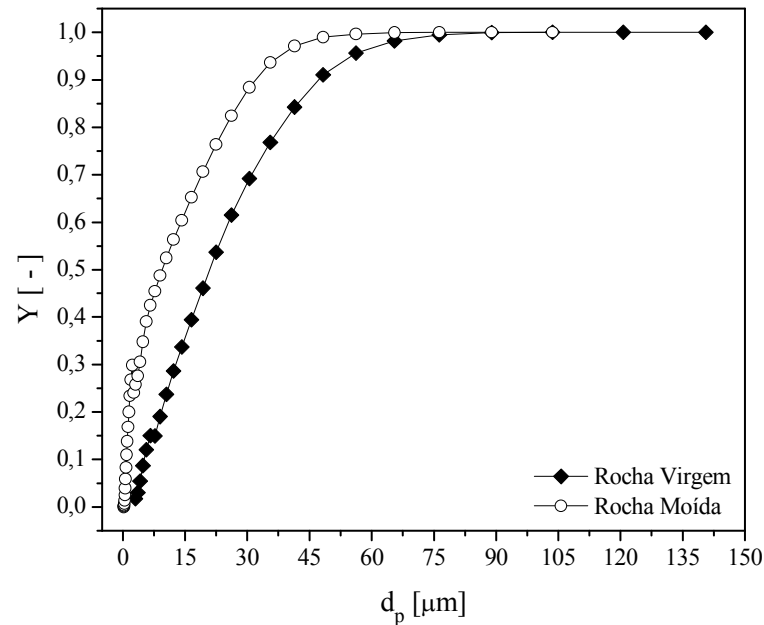


Figura 3.8 – Distribuição granulométrica da Rocha Fosfática Virgem e da Rocha Fosfática Moída, na alimentação dos ensaios.

No entanto, para a realização dos cálculos, realizou-se novas análises no *Mastersizer*, para se conhecer a distribuição granulométrica dos materiais nas tortas de filtração. A Figura 3.9 apresenta a distribuição granulométrica média da rocha fosfática virgem e da rocha fosfática moída nas tortas de filtração.

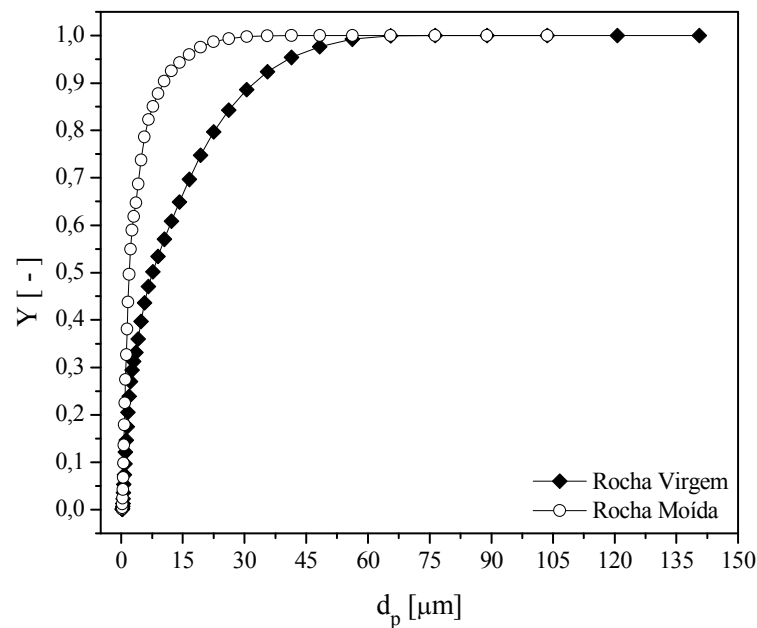


Figura 3.9 – Distribuição granulométrica média da Rocha Fosfática Virgem e da Rocha Fosfática Moída, nas tortas de filtração.

O Polvilho Doce utilizado nos testes era da marca *Yoki Alimentos Ltda.*, lote *A2L-A44F*. A análise para se conhecer sua distribuição granulométrica foi realizada no *Mastersizer*, mesmo sendo o polvilho solúvel em água, pois o manual do equipamento indicava a água como solvente para a análise de amidos. Tomou-se a precaução de adquirir o mesmo produto (da mesma marca) que já havia sido utilizado em trabalhos relacionados na literatura. O valor encontrado para o diâmetro característico do polvilho doce esteve na média dos valores indicados nos trabalhos de Azevedo (2009), Barros (2010) e Rodrigues (2006). A Figura 3.10 apresenta a distribuição de frequência do polvilho doce, a qual obedeceu à distribuição log-normal.

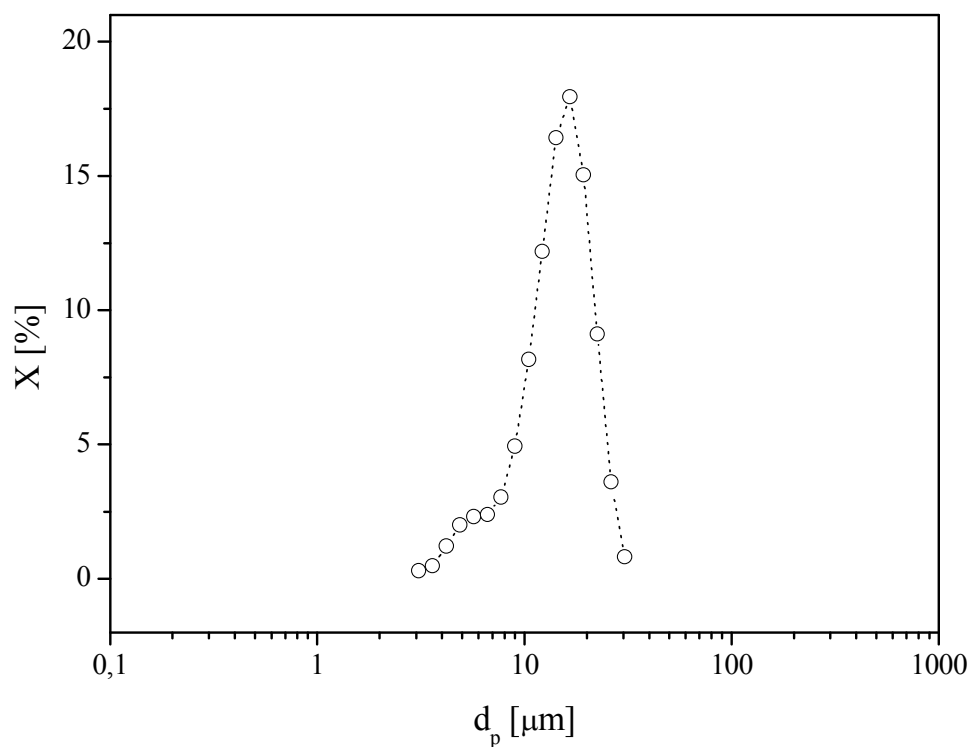


Figura 3.10 – Distribuição de frequência das partículas de polvilho doce.

A definição dos tamanhos das partículas é feita utilizando-se o conceito de esferas equivalentes, as quais têm as mesmas propriedades da partícula real, como massa e volume, por exemplo. Diferentes técnicas de medida utilizam diferentes esferas equivalentes. A Figura 3.11 ilustra o conceito de esferas equivalentes.

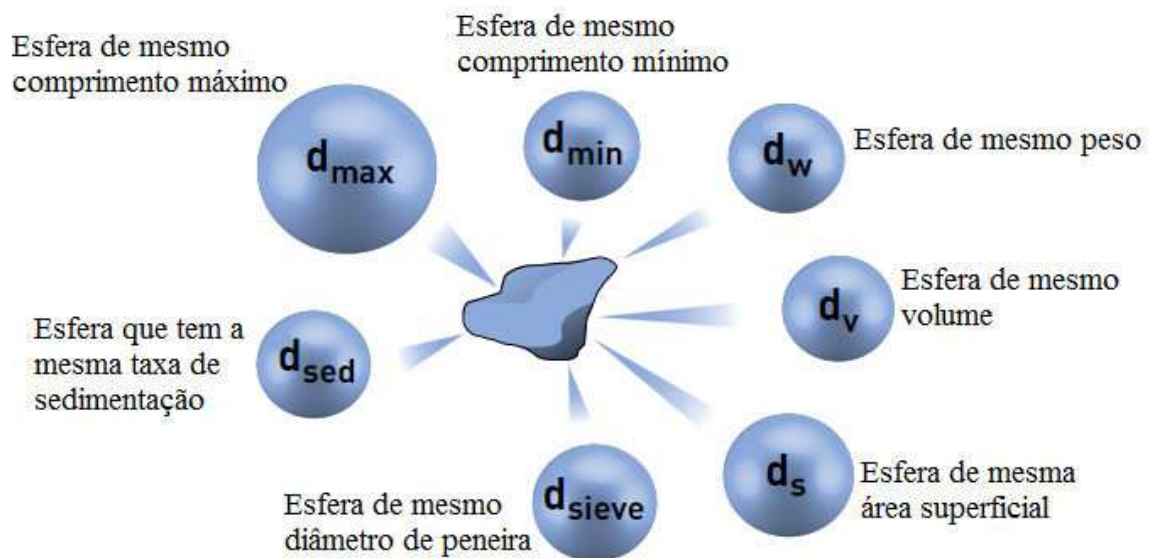


Figura 3.11 – Exemplos de esferas equivalentes (Fonte: *MALVERN INSTRUMENTS LIMITED*, 2012).

A Tabela 3.1 apresenta os valores de diâmetros característicos para a rocha fosfática virgem, rocha fosfática moída e polvilho doce, bem como a densidade de cada material. A densidade foi determinada por picnometria a Hélio, no equipamento *ACCUPYC 1330*, da *Micromeritics* do Laboratório de Caracterização de Partículas da FEQUI/UFU.

Tabela 3.1 – Valores do diâmetro característico e da densidade dos materiais.

Material	Rocha Fosfática Virgem	Rocha Fosfática Moída	Polvilho doce
D(3,2) na alimentação [μm]	13,77	2,5	11,57
D(3,2) na torta [μm]	2,90	2,28	13,97
ρ [kg/m^3]	3055($\pm 1,3$)	3044($\pm 1,0$)	1535($\pm 2,3$)

O diâmetro médio volumétrico, D(4,3), é mais sensível às maiores partículas presentes na distribuição, ao contrário do diâmetro médio de *Sauter*, D(3,2), que monitora a proporção de partículas finas presentes na distribuição (*MALVERN INSTRUMENTS LIMITED*, 2012). A Figura 3.12 mostra essa relação.

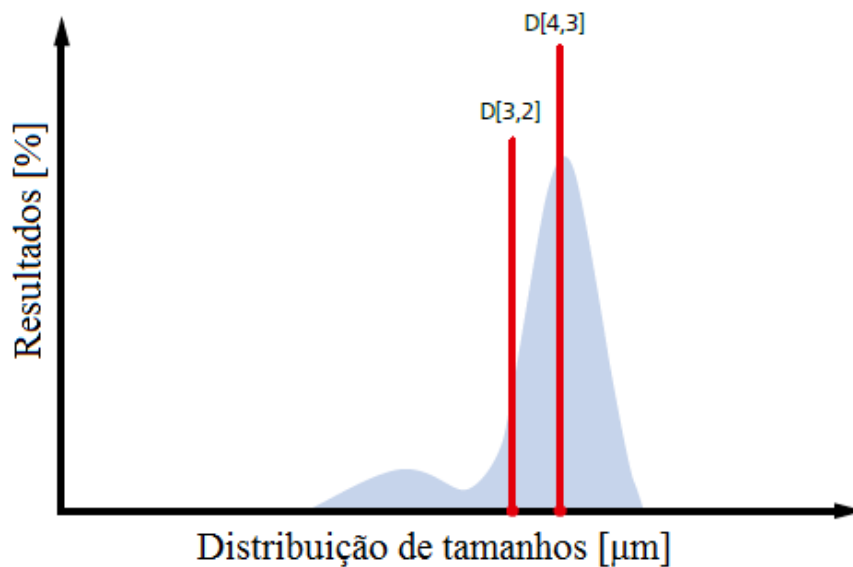


Figura 3.12 – Ilustração do $D[4,3]$ e do $D[3,2]$ de uma distribuição de tamanho de partículas na qual há uma significativa proporção de partículas finas (Fonte: *MALVERN INSTRUMENTS LIMITED*, 2012).

Uma das condições para o uso da correlação de Endo *et al.* (1998) é que a distribuição de partículas obedeça à distribuição log-normal, conforme foi visto no Capítulo 2. Sendo assim, realizou-se o cálculo da porosidade pela correlação proposta por Endo *et al.* (1998) apenas para as partículas de polvilho. O fator de forma dinâmico (k) foi obtido pelo uso da Equação (2.6) (DAVIES, 1979), substituindo-se o diâmetro de *Stokes* pelo diâmetro médio de *Sauter*. O cálculo do desvio geométrico (σ_g), foi definido pelo razão entre o $d_{p84,13}$ e o d_{p50} da curva de distribuição granulométrica (TANABE, 2011). A Tabela 3.2 apresenta os valores característicos dos três materiais.

Tabela 3.2 – Caracterização dos materiais particulados.

Caracterização	Material Particulado		
	Rocha Virgem	Rocha Moída	Polvilho Doce
$D(4,3)$ [μm]	14,71	12,27	13,84
d_g [μm]	4,19	4,19	9,71
$D(3,2)$ [μm]	2,91	2,28	11,57
σ_g	2,98	4,41	1,37
k	24,35	27,27	1,42

A fim de garantir a mesma vazão de alimentação para os três tipos de materiais pulverulentos, realizou-se a calibração do prato giratório e da vazão de sucção do Venturi.

Neste procedimento utilizou-se um saco de aspirador de pó e um cronômetro. Para cada velocidade de rotação do prato, foram colocados em tabelas os valores correspondentes, para um volta do prato, à: 1) massa do saco vazio, 2) massa do saco + pó, 3) tempo de uma volta, 4) massa de pó sugada e 5) vazão de alimentação calculada.

Foram feitas, em média, dez medidas para cada velocidade de rotação do prato, que correspondiam, respectivamente, a 5%, 10%, 15%, 20% e 25% da máxima velocidade de rotação do prato giratório.

A calibração do prato giratório forneceu os resultados expostos na Figura 3.13.

Nos ensaios realizados foi utilizada uma vazão de alimentação média de 0,183 g/s, para os três materiais, o que equivalia à rotação de 20% para a rocha fosfática moída, 15% para a rocha fosfática virgem e 13,2% para o polvilho doce.

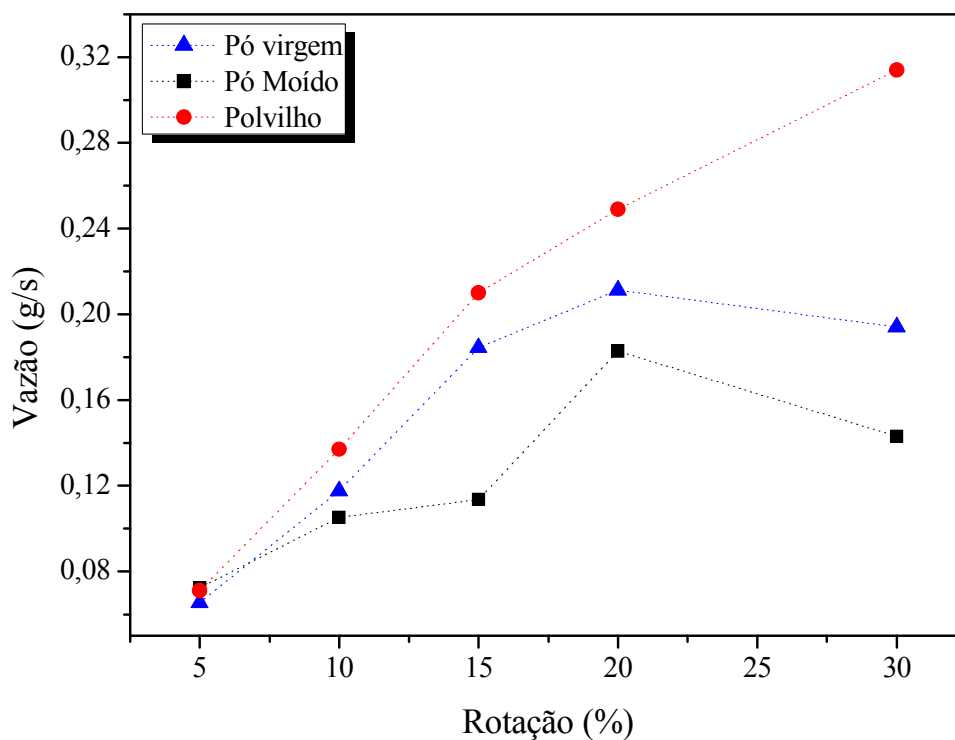


Figura 3.13 – Vazão mássica média de alimentação para cada material particulado no sistema de filtração.

3.3 Meio Filtrante

Os tecidos utilizados na realização dos ensaios foram fornecidos pela empresa *Gino Cacciari Têxteis Técnicos Ltda* com sede na cidade de Porto Feliz (SP).

As especificações técnicas dos meios filtrantes são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Especificações dos meios filtrantes (*GINO CACCIARI TÊXTEIS TÉCNICOS Ltda*).

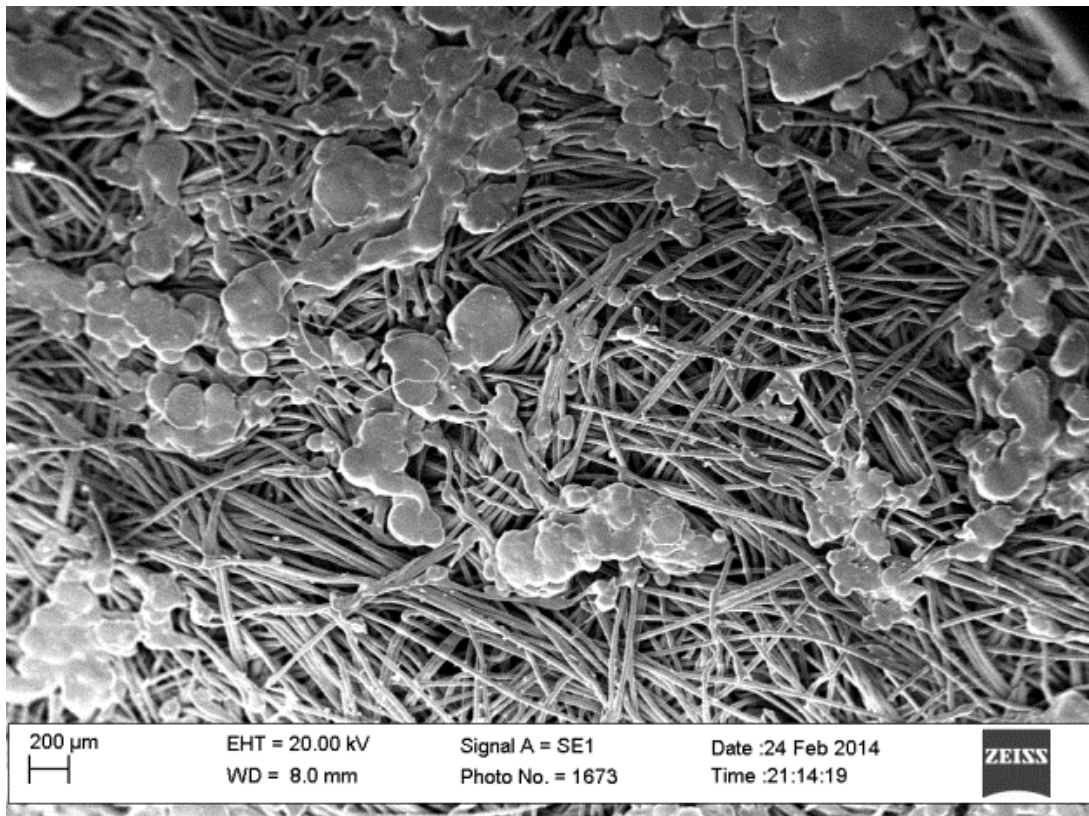
Tecido	Poliéster	Polipropileno
Fibra	100% poliéster	100% polipropileno
Contextura	Agulhado	Agulhado
Cor	Branco natural	Branco natural
Espessura [mm]	2	2,1
Peso [g/m²]	550	550
Permeabilidade ao ar/NBR 13706 [cfm/pé² a ½” de H₂O]	31	32,5
ρ [g/cm³]	0,28	0,26
Volume de poros	82%	-
Acabamento	Calandrado e Chamuscado de um lado	Calandrado e Chamuscado de um lado

A estrutura superficial dos tecidos pode ser vista na Figura 3.14. As imagens foram obtidas no Laboratório Multiusuário de Microscopia da FEQUI/UFU por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) da marca *Carl Zeiss*, modelo *EVO MA10*, utilizando o detector de elétrons secundários.

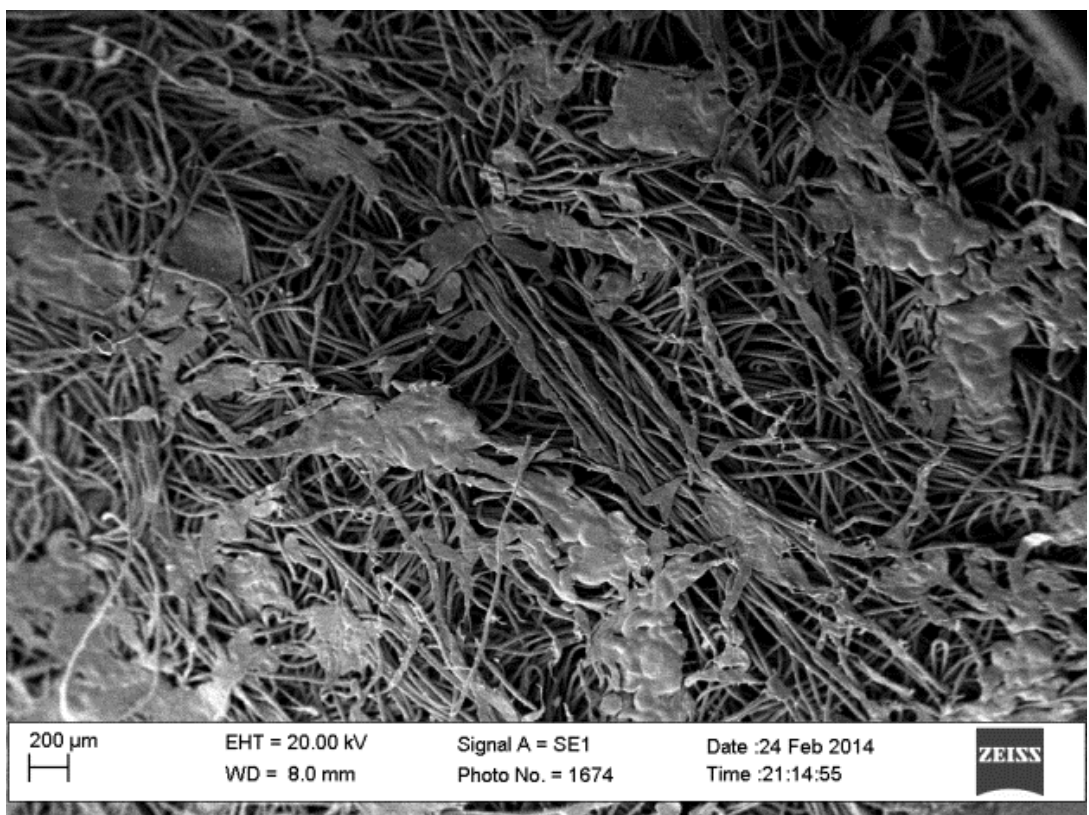
Nota-se pela análise da Figura 3.14 que a estrutura superficial do poliéster é mais aberta que a estrutura superficial do polipropileno.

A Figura 3.15 mostra a estrutura interna das fibras de ambos os filtros de tecido.

Observando as Figuras 3.14 e 3.15, nota-se que a principal diferença entre um tecido e outro está na abertura superficial, que é maior no poliéster que no polipropileno. Há diferenças também nos diâmetros das fibras de ambos os filtros, o que, no entanto, não pode ser observado com clareza nas imagens da estrutura dos filtros, conforme as Figuras 3.14 e 3.15.

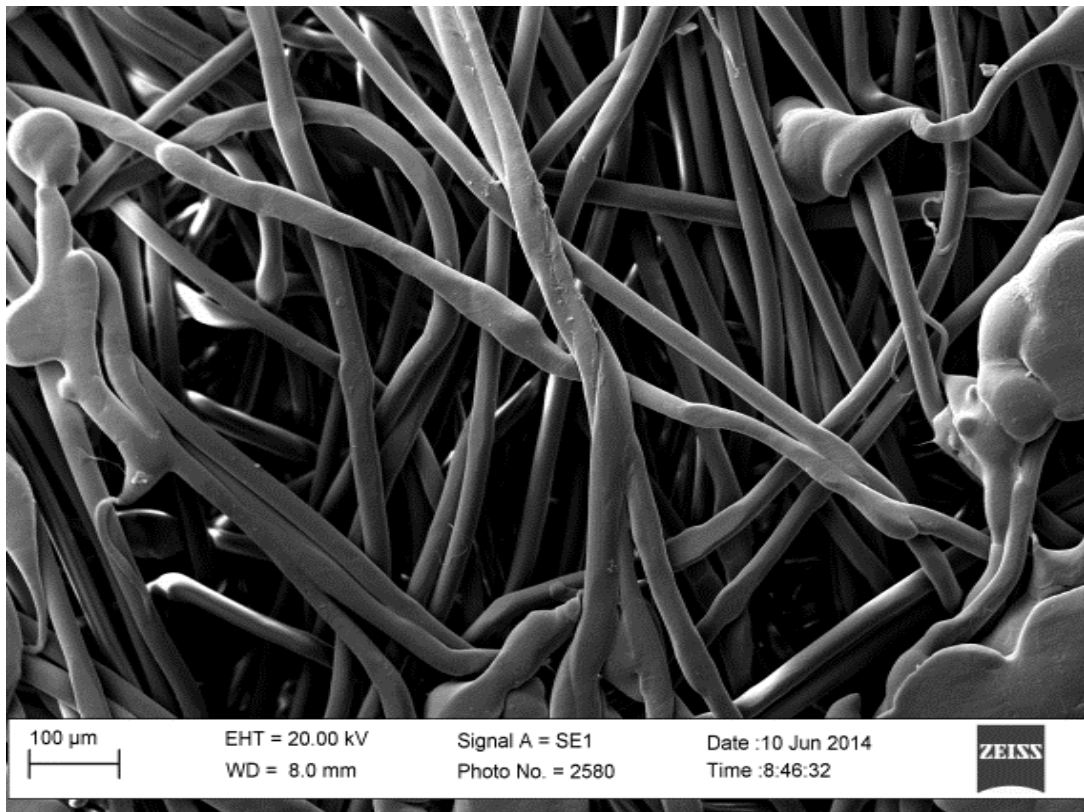


(a)

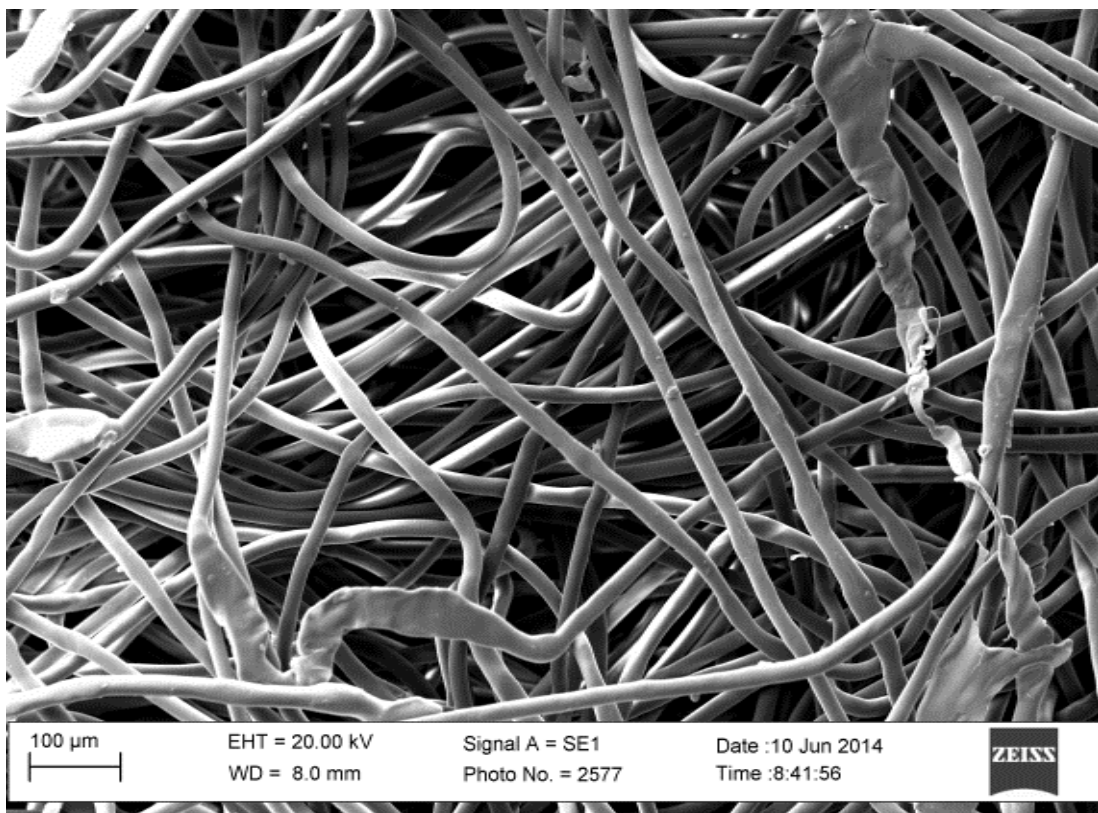


(b)

Figura 3.14 – Estrutura superficial dos meios filtrantes: (a) polipropileno, (b) poliéster.



(a)



(b)

Figura 3.15 – Estrutura interna das fibras dos meios filtrantes: (a) polipropileno, (b) poliéster.

3.4 Metodologia

Os ensaios experimentais realizados neste trabalho foram divididos em cinco etapas, que seguem o procedimento geral, com algumas particularidades.

3.4.1 Procedimento Geral

A preparação para os ensaios começava, pelo menos, 24 h antes do início dos testes. O material particulado a ser filtrado era colocado na estufa, a uma temperatura de 100 °C, permanecendo nessa condição por, no mínimo, 24 h, para garantir que toda a umidade livre e presente no material fosse retirada.

No momento do ensaio, as colunas eram preenchidas com a sílica gel previamente retirada da estufa. Acionava-se o compressor de ar, a fim que houvesse um abastecimento de ar seco para dentro da câmara de filtração. O psicrômetro de bulbo úmido era, então, umedecido. O fluxo de ar seco para dentro da câmara de alimentação continuava até que a leitura das temperaturas dos termômetros do psicrômetro de bulbo seco e bulbo úmido, na carta psicrométrica, indicava uma umidade relativa entre 10% e 20% dentro da câmara de alimentação. A umidade ambiente, na sala do ensaio, era medida por meio de um higrômetro digital.

O meio filtrante, com área de filtração de 0,0153 m², era então preparado, sendo cortado nas dimensões de um molde pré-confeccionado, a fim de garantir o melhor ajuste entre as duas partes cilíndricas da câmara de filtração. Media-se, na balança, a massa do filtro limpo. A câmara de filtração era, então, fechada com 6 parafusos de ¼ de polegada, tendo o filtro de tecido e uma guarnição de borracha (para evitar vazamento de ar) encaixados entre suas duas partes cilíndricas. Nos experimentos com vibração mecânica, prendia-se uma haste de metal, flexível, sobre a parte cilíndrica móvel do filtro, e ligava-se o inversor de frequência, programando-o para operar na frequência escolhida; o inversor de frequência ficava em *stand-by* até o início do experimento.

Na Figura 3.16 são mostrados os detalhes do fechamento do filtro.

Verificava-se a placa de orifício que estava sendo utilizada na unidade, garantindo que o processo de filtração ocorresse com a placa de 8 mm de diâmetro. Conectava-se as

mangueiras para a tomada de pressão e ligava-se o motor do prato giratório. O comando de válvulas era acionado manualmente, garantindo a direção e a velocidade do fluxo de ar.

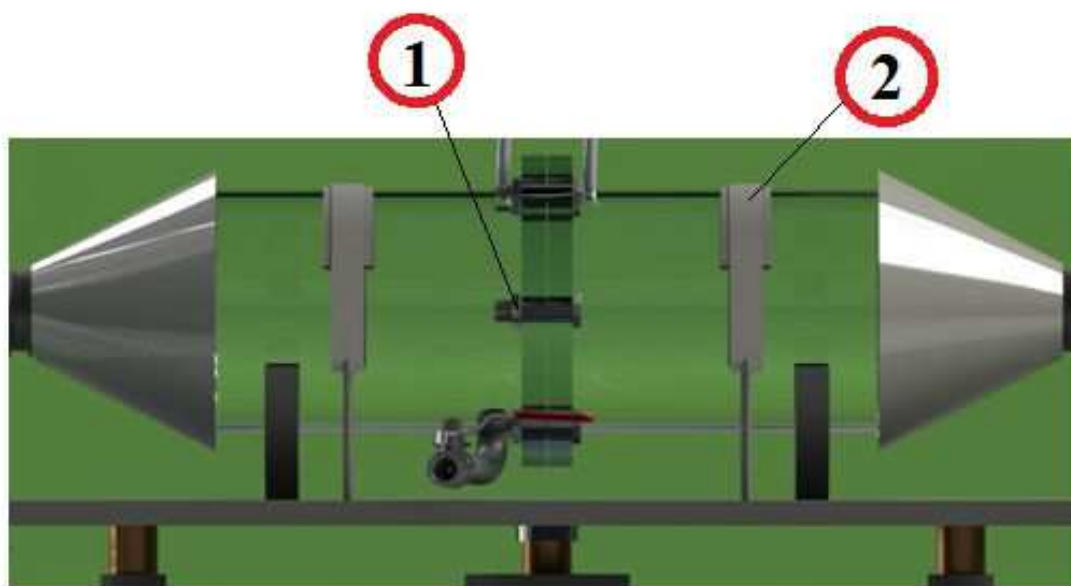


Figura 3.16 – Detalhes do fechamento do filtro: 1) parafusos que unem as duas partes cilíndricas da câmara de filtração; 2) haste de metal flexível para imobilização da câmara de filtração durante os processos com vibração mecânica.

O pó, ao ser retirado da estufa, antes de se iniciar o ensaio, era conduzido ao dessecador preenchido, em parte, com sílica gel, a fim de que o material particulado atingisse a temperatura ambiente, mas não adquirisse umidade. Quando a câmara de alimentação atingia a faixa de umidade requerida para dar início ao experimento, então o pó era colocado dentro da câmara de alimentação e, esta, vedada.

O início do experimento dava-se com o acionamento do soprador. O cronômetro e o motor do prato giratório, carregado com material particulado, eram acionados no mesmo instante. Como a unidade experimental não era automatizada, era necessário que três pessoas trabalhassem simultaneamente durante os ensaios. A alimentação de material particulado para o prato giratório, bem como o controle da pressão de ar na câmara de alimentação era responsabilidade de uma pessoa. Outra pessoa era responsável por controlar a vazão de ar do soprador, mantendo-a constante durante o ensaio. E uma terceira pessoa era responsável por cronometrar o tempo de filtração, ao mesmo tempo em que marcava, de 5 em 5 s, a evolução da queda de pressão. A alimentação de pó para o sistema era interrompida assim que a queda de pressão máxima determinada nos ensaios era atingida. Finalizava-se o ensaio de filtração desligando-se o soprador.

Nos testes nos quais não havia a etapa de limpeza por ar reverso, procedia-se com a retirada do filtro de tecido, cuja massa era novamente medida. Obtinha-se, assim, a massa da torta de filtração. O pó correspondente à torta era reservado para posterior análise no *Mastersizer*.

Nos testes nos quais havia a etapa de limpeza da torta por ar reverso, retirava-se o filtro com a torta formada no processo de filtração, cuidadosamente. Limpava-se todo o pó presente na câmara de filtração. Em seguida, o filtro com a torta de filtração era cuidadosamente colocado na câmara de filtração, que era, então, fechada com os parafusos. Trocava-se a placa de orifício de 8 mm de diâmetro para a placa de orifício de 10 mm de diâmetro. Invertia-se a direção do fluxo de ar do soprador, através do controle de válvulas. Ligava-se, então, o soprador. Durante o tempo de 1 min, acontecia a limpeza do filtro. De acordo com Tieni (2005), após 1 min de limpeza não há mais remoção da torta. Por isso foi utilizado esse tempo na limpeza da torta de filtração.

Depois desse tempo, o soprador era desligado. Abria-se o filtro, recolhia-se o pó liberado na limpeza, o qual tinha sua massa medida na balança de precisão. O filtro “sujo” era pesado, ao final do experimento. Obtinha-se, assim, a massa da torta de filtração, a massa de pó desprendida na limpeza e a massa de pó retida sobre o meio filtrante.

As velocidades de filtração e limpeza foram escolhidas levando-se em consideração a calibração do sistema, a metodologia de controle manual e leitura da queda de pressão equivalente à velocidade requerida no processo. Na maioria das aplicações industriais, a velocidade de filtração tem valores entre 0,5 e 6,2 cm/s (LEITH; ALLEN, 1986). No entanto neste trabalho foram utilizados valores de velocidade de filtração e limpeza na faixa dos empregados em trabalhos da literatura, como Tieni (2005), Rodrigues (2006), Tognetti (2007), Tanabe (2008), Fagnoli (2010), Rocha (2010) e Nunes (2011).

Os valores de velocidade de filtração e velocidades de limpeza utilizados nos ensaios estão expostos na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores de velocidades utilizados neste trabalho.

Velocidades	
Filtração	Limpeza
10 cm/s	7 cm/s
	11 cm/s
	15,5 cm/s

3.4.2 Etapa 1: Testes Preliminares

Na etapa de Testes Preliminares, analisou-se o comportamento do sistema submetido à vibração mecânica.

Acionou-se o motor acoplado a um eixo equipado com came excêntrico (motovibrador) e, através do inversor de frequência, foi possível se fazer uma observação inicial do movimento do sistema submetido a cada frequência (3 a 21 Hz). A mínima frequência de vibração provocada pelo acionamento do motor era de 3 Hz. Foi estabelecido um limite máximo de 21 Hz, levando-se em consideração a fragilidade da câmara de filtração construída com acrílico. Em seguida, foram selecionadas algumas frequências de vibração para serem testadas.

Os ensaios seguiam a descrição do procedimento geral. Nos testes com vibração mecânica, o motor de vibração era acionado por meio do inversor de frequência, imediatamente depois que o soprador era ligado, dando início ao processo de filtração. A vibração do sistema ocorria concomitantemente ao processo de filtração. O motor vibratório só era desligado no fim do experimento, depois que o soprador era desligado.

A amplitude de cada frequência de vibração foi medida pelo método gráfico, conforme o procedimento adotado por Moreira (1998). Notou-se que esta seria a variável de maior dificuldade para o controle, pois, além de depender da frequência de vibração, era também uma função do número de eixos, da posição em relação à rotação em torno do eixo e da distância entre os eixos, fatores estes que definiam a excentricidade do sistema de vibração.

O acionamento do motovibrador provocava o deslocamento da haste interior central do apoio, o que promovia um movimento oscilatório na direção vertical, no suporte da bancada da câmara de filtração, o que pode ser visto no detalhe da Figura 3.17. O método gráfico consistiu na fixação de um indicador gráfico (caneta) no suporte da câmara de filtração, conforme pode ser visto na Figura 3.18.

Uma folha de papel foi fixada em uma prancheta, apoiada em posição perpendicular ao suporte da bancada. O indicador gráfico assinalava, através de “riscos” na folha de papel, a amplitude de vibração, cuja leitura foi efetuada com uma régua milimetrada.

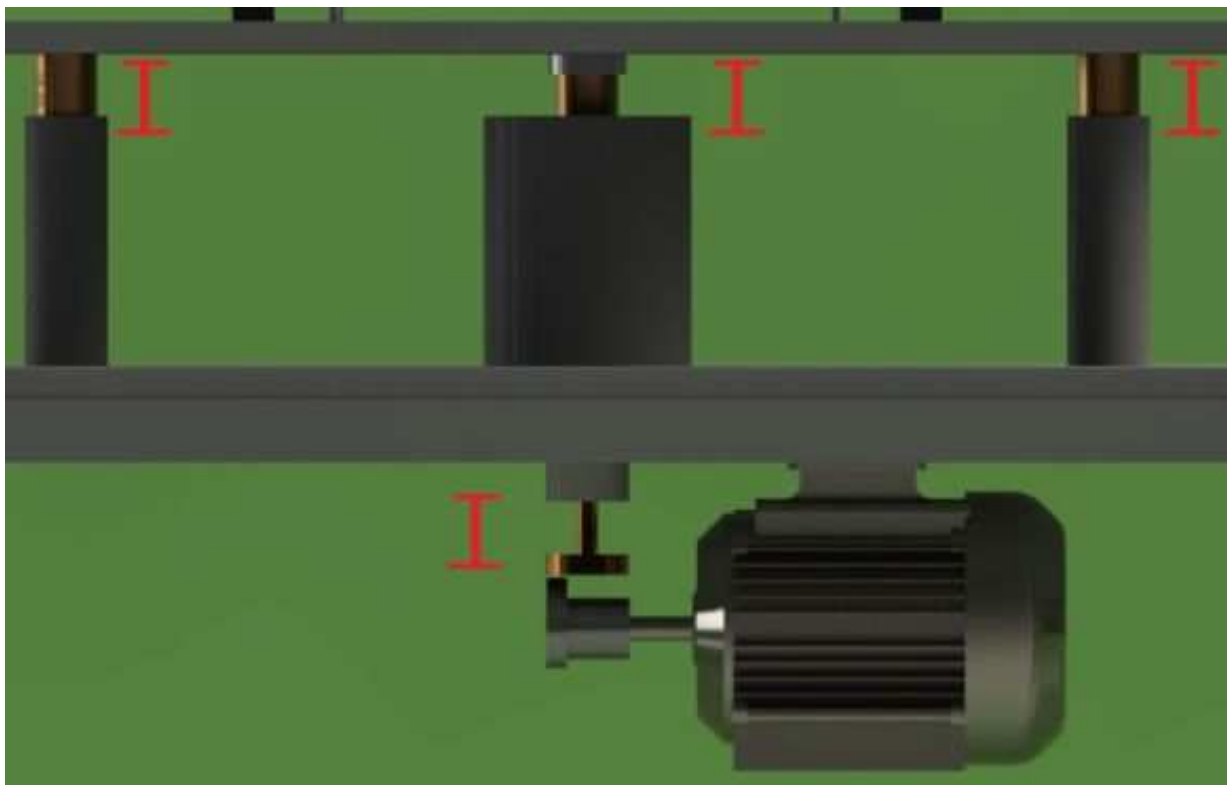


Figura 3.17 – Detalhe da haste central e das barras que promovem o movimento oscilatório na direção vertical.

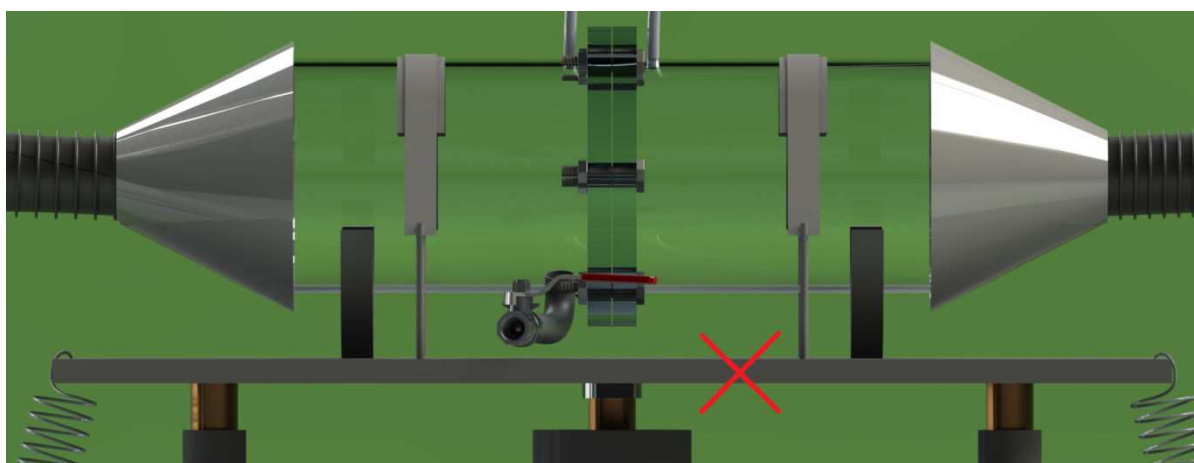


Figura 3.18 – Detalhe do local onde foi fixado o indicador gráfico, no apoio da câmara de filtração.

Os valores de amplitude medidos para cada frequência de vibração selecionada para a realização dos testes preliminares estão expostos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Amplitude das frequências selecionadas para os testes preliminares.

f [Hz]	d [mm]
5	2,25
6	2,50
7	3,00
8	3,00
12	2,50
13	3,50
14	3,00
16	3,25
17	1,50
18	2,00
19	1,75
20	1,75
21	1,75

Os valores operacionais de queda de pressão nas indústrias variam de 750 a 2000 Pa, o que equivale ao intervalo de 7,65 a 20,39 cm de H₂O (SEVILLE *et al.*, 1997). Nesta etapa do trabalho, a fim de se prolongar o tempo de filtração para melhor avaliação das respostas, foi fixada uma queda de pressão máxima de 4903 Pa, equivalente à coluna de 50 cm de água. Os ensaios preliminares foram realizados utilizando-se rocha fosfática moída como material particulado e filtro de poliéster. Foi medido o tempo de filtração em cada ensaio, bem como a massa de pó acumulada por unidade de área e a porosidade das tortas de filtração formadas sob a influência das diferentes frequências de vibração. Todas essas variáveis foram comparadas com os valores obtidos a partir do sistema operando sem a vibração mecânica.

3.4.3 Etapa 2: Três Faixas de Frequências de Vibração

Nesta etapa, considerando-se os resultados da etapa preliminar, três frequências foram selecionadas em três faixas de vibração:

- Baixa Frequência: 5, 6 e 7 Hz;
- Média Frequência: 12, 13 e 14 Hz;
- Alta Frequência: 18, 19 e 20 Hz.

Estabeleceu-se 4903 Pa como a queda de pressão máxima dos ensaios. Os testes foram realizados usando-se rocha fosfática moída e filtro de poliéster. Não houve limpeza do filtro por ar reverso nesta etapa. Foram executadas tréplicas para cada frequência de vibração testada. As respostas medidas nessa etapa foram a massa de pó acumulada por unidade de área, o ponto de colmatação em cada ensaio e a espessura das tortas de filtração. Os resultados foram comparados entre si, em cada faixa de frequência. Todas as respostas obtidas nesta etapa foram avaliadas partindo dos valores encontrados para o sistema funcionando sem a influência da vibração mecânica.

Em seguida, foram escolhidas três frequências, uma em cada faixa, para a realização dos próximos ensaios. O critério utilizado para a escolha foi a fixação de um mesmo intervalo entre uma frequência e a próxima. Considerando-se a fragilidade da câmara de filtração, optou-se por empregar como frequência máxima a vibração com 19 Hz. Sendo assim, as frequências selecionadas foram: 19 Hz (faixa alta), 13 Hz (faixa média) e 7 Hz (faixa baixa).

Também nesta etapa, foi testada a influência das frequências de vibração escolhidas nas variáveis obtidas a partir da filtração utilizando-se o filtro de polipropileno. A queda de pressão máxima estabelecida foi de 4903 Pa. As respostas observadas foram a massa de pó acumulada por unidade de área, o ponto de colmatação e a espessura das tortas formadas. Esses valores foram analisados tomando-se por base os valores obtidos no teste estático.

Os valores obtidos na filtração em filtro de polipropileno foram comparados aos valores encontrados nos ensaios em filtro de poliéster, para cada frequência de vibração testada.

3.4.4 Etapa 3: Curvas de Filtração

Para a realização dos testes desta etapa, optou-se por avaliar o comportamento do sistema de filtração submetido à vibração com maior queda de pressão máxima estabelecida, alterando o valor de 4903 Pa para 9806 Pa, pressão equivalente à coluna de 100 cm de água. Foram realizados testes com rocha fosfática moída, rocha fosfática virgem e polvilho doce, em filtro de poliéster.

As frequências de vibração utilizadas nos testes com rocha moída foram 7 Hz e 13 Hz. Definiu-se realizar os testes com rocha virgem e polvilho doce usando apenas uma frequência de vibração, a fim de que a comparação fosse entre o sistema estático e o sistema

vibrando, uma vez que outras variáveis (diâmetro da partícula e fator de forma dinâmico) certamente provocariam efeito cruzado nos resultados. A frequência escolhida para a realização dos testes com rocha virgem e polvilho doce foi de 7 Hz. Em todos os testes, as variáveis analisadas foram: o formato da curva de filtração, o ponto de colmatação, a massa acumulada por unidade de área, o arraste do filtro, a resistência específica da torta de filtração, a porosidade e a espessura da torta de filtração.

Os ensaios seguiam a descrição do procedimento geral. Nos testes com vibração mecânica, o motor de vibração era acionado por meio do inversor de frequência, imediatamente depois que o soprador era ligado, dando início ao processo de filtração. A vibração do sistema ocorria concomitantemente ao processo de filtração. O motor vibratório só era desligado no fim do experimento, depois que o soprador era desligado.

Foi realizado nesta etapa um teste com o sistema híbrido, no qual a operação de filtração se iniciava com o sistema sem vibrar. No momento em que a queda de pressão no meio filtrante atingia a marca de 4903 Pa (equivalente à coluna de 50 cm de H₂O), o motor responsável por produzir o movimento vibratório era acionado, com frequência de vibração de 13 Hz. O ensaio continuava submetido à vibração até que fosse alcançada a máxima queda de pressão estabelecida, de 9806 Pa. Nesse instante, a alimentação de pó era interrompida e o soprador e o motovibrador eram desligados.

3.4.5 Etapa 4: Força de Adesão

Os testes desta etapa foram realizados de acordo com o procedimento descrito na subseção 3.4.4, sendo, no entanto, realizada a etapa de limpeza por ar reverso.

Nos ensaios com a rocha fosfática moída, após o desligamento do soprador e do motovibrador, no final do processo de filtração, o meio filtrante era, cuidadosamente, retirado da câmara de filtração e levado para ter sua massa medida na balança de precisão. Retirava-se da câmara de filtração o material particulado que não havia chegado ao filtro de tecido. O meio filtrante era, então, novamente colocado na câmara de filtração. Fechava-se a câmara de filtração e realizava-se a troca da placa de orifício de 8 mm de diâmetro interno para a placa de 10 mm de diâmetro interno. Alternava-se a direção do fluxo de ar do soprador por meio do comando de válvulas.

A limpeza do filtro ocorria em três etapas, com três diferentes velocidades do ar:

- A primeira velocidade de limpeza utilizada era de 7 cm/s. Ligava-se o soprador e, durante o procedimento da primeira limpeza, anotava-se o valor da queda de pressão na torta. Depois de 1 min de limpeza, o soprador era desligado, o filtro, retirado da câmara de filtração e levado para ter sua massa medida na balança. A massa de pó que havia se desprendido do filtro de tecido durante a primeira limpeza era recolhida e medida. O meio filtrante era novamente encaixado na câmara de filtração.
- Realizava-se a segunda limpeza, sendo a velocidade do ar de 11 cm/s. Ligava-se o soprador e, durante o procedimento da segunda limpeza, anotava-se o valor da queda de pressão na torta. Depois de 1 min de limpeza, o soprador era desligado, o meio filtrante era retirado da câmara de filtração e levado para ter sua massa medida. A massa de pó que havia se desprendido durante a segunda limpeza era recolhida e medida.
- Prosseguia-se, finalmente, para a terceira limpeza, a uma velocidade de 15,5 cm/s. Ligava-se o soprador e, durante o procedimento da terceira limpeza, anotava-se o valor da queda de pressão na torta. Passados os 60 s da última limpeza, o soprador era desligado, o meio filtrante era retirado da câmara de filtração e levado para ter sua massa medida. A massa de pó desprendida na terceira limpeza era recolhida da câmara de filtração e medida.

Terminado o ensaio, tinha-se conhecimento: da massa total da torta de filtração, da massa de pó desprendida durante cada uma das três limpezas do filtro, da massa retida no filtro após cada uma das limpezas e da queda de pressão no meio filtrante após cada uma das três limpezas. Esses resultados eram, então, tratados seguindo a metodologia proposta por Seville *et al.* (1989), conforme descrito na seção 2.5 do Capítulo 2.

Esse procedimento foi realizado nos ensaios com rocha moída, rocha virgem e polvilho doce, em todas as trélicas, em todas as frequências de vibração testadas e para o sistema estático.

Nesta etapa foi realizado o aterramento do filtro para a realização de dois testes. O objetivo da realização desses testes era verificar se o movimento vibratório da câmara de filtração estaria exercendo alguma influência na carga estática das partículas. Esses testes foram feitos apenas com a rocha moída, em filtro de poliéster, com frequência de vibração de 7 e 13 Hz.

O aterramento foi realizado com a ligação de um fio terra em uma barra de ferro, completamente submerso no solo. A outra extremidade do fio terra era acoplada a uma fina tela de metal, que foi colocada em contato com o meio filtrante, no interior da câmara de filtração. Os testes de filtração foram realizados conforme especificado no procedimento geral, sendo as três limpezas executadas de acordo com o exposto nesta seção. Os resultados obtidos foram tratados pela metodologia proposta por Seville *et al.* (1989) e comparados aos resultados do sistema funcionando sem o aterramento.

3.4.6 Etapa 5: Ciclos de Filtração

Nesta etapa foram realizados testes com o sistema estático e com o sistema vibrando com 7 Hz de frequência, utilizando-se rocha fosfática moída como material particulado e meio filtrante de poliéster.

Os ciclos de filtração consistiam em testes nos quais a filtração ocorria de acordo com o procedimento geral descrito no Subitem 3.4.1, seguida pela limpeza do meio filtrante por fluxo de ar reverso. A limpeza do meio filtrante era feita em apenas uma etapa. Foi utilizada a velocidade de limpeza de 15,5 cm/s. De acordo com Tognetti (2007), as maiores velocidades de limpeza apresentam melhor regeneração do tecido, tendo como consequência menor perda de carga residual.

O meio filtrante submetido ao processo de limpeza foi retirado da câmara de filtração para ter sua massa medida. Então, o mesmo meio filtrante foi colocado novamente na câmara de filtração, para ser submetido a um novo ciclo de filtração e limpeza. Esse procedimento foi repetido até que se completassem 10 ciclos. No final dos 10 ciclos, conhecia-se: a massa da torta, a massa de pó retida, a massa de pó desprendida e o tempo de filtração de cada ciclo.

Realizou-se 1 teste com 10 ciclos para o sistema estático e 1 teste com 10 ciclos para o sistema submetido à vibração de 7 Hz de frequência.

O presente capítulo apresentou os principais materiais e metodologias utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho. O capítulo seguinte apresentará os principais resultados obtidos, assim como as discussões dos mesmos.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, os resultados obtidos nos ensaios de filtração com vibração contínua são apresentados em sete Seções, a saber:

4.1 Testes preliminares;

4.2 Avaliação de três faixas de frequências (baixa: 5, 6 e 7 Hz; média: 12, 13 e 14 Hz e alta: 18, 19 e 20 Hz);

4.3 Curvas de filtração: rocha moída, rocha virgem e polvilho;

4.4 Força de adesão: rocha moída, rocha virgem e polvilho;

4.5 Ciclos de filtração: rocha moída – 10 ciclos estáticos e 10 ciclos a 7 Hz;

4.6 Análise energética do processo: número de Euler.

4.7 Análise geral da vibração nos sistemas testados.

4.1 Testes Preliminares: Análise de diferentes frequências de vibração

O objetivo dessa etapa foi verificar o funcionamento do equipamento, avaliando o efeito de diferentes frequências de vibração durante o processo de filtração de partículas. Por esse motivo, não foram realizadas réplicas para os resultados desta seção de testes, uma vez que os testes foram realizados com o intuito de tornar a dinâmica do processo conhecida.

Foram avaliados, para um ciclo de filtração, sem réplicas, os efeitos das frequências de 0, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20 e 21 Hz nas respostas: tempo de filtração (t), massa de pó acumulada por unidade de área (W) e porosidade da torta de filtração (ϵ) formada sobre o filtro sintético. O material utilizado nesta etapa foi a rocha fosfática moída, com vazão de alimentação de 0,183 g/s, velocidade de filtração de 10 cm/s e filtro sintético de poliéster (PE).

A Figura 4.1 mostra o tempo de filtração para que a queda de pressão no filtro, devida à formação da torta, alcançasse um valor de 4903 Pa, equivalente a uma coluna de 50 cm de H₂O. Foi possível observar que, inicialmente, as frequências de vibração de 5, 6, 7, 8, 12, 13, 19 e 20 Hz proporcionaram tempos de filtração maiores que o tempo de filtração do sistema estático (f: 0 Hz – t: 25,43 s), sendo o tempo encontrado para cada frequência de vibração, respectivamente: 30; 37,93; 40,09; 28,84; 38,97; 37,03; 36,50 e 27,50 s.

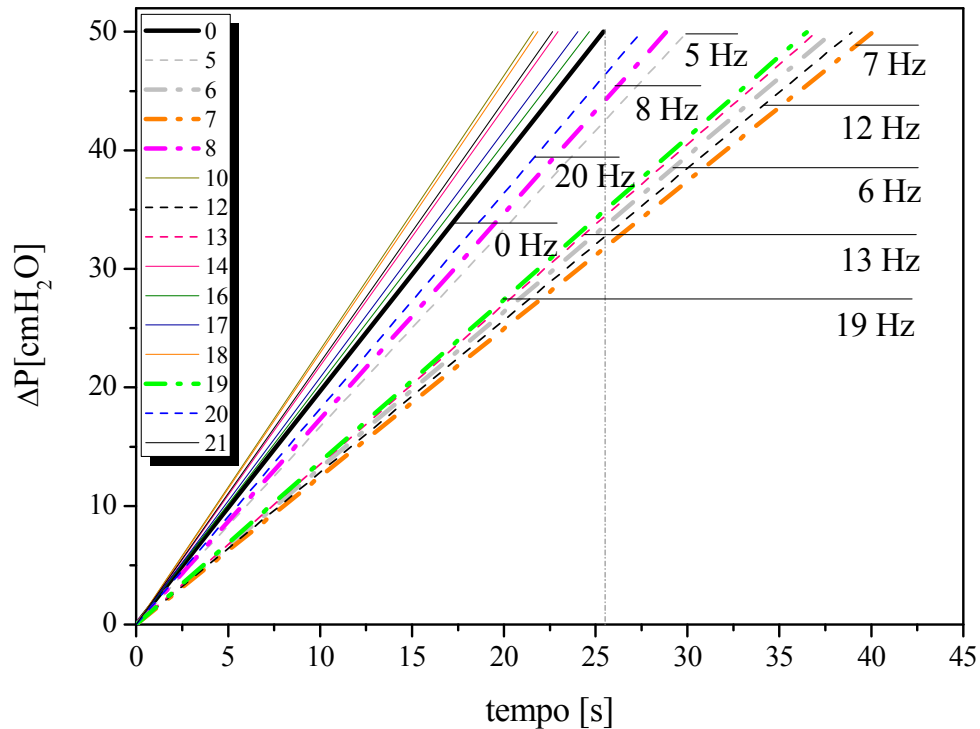


Figura 4.1 – Tempo de filtração para cada frequência de vibração ($\Delta P_{\max}=4903$ Pa).

Inicialmente, não foi possível observar nenhum padrão de comportamento entre a frequência de vibração e a variável tempo de filtração, sendo que as altas frequências não apresentaram os maiores valores de tempo de filtração, e nem as baixas frequências, os menores tempos de filtração, para a queda de pressão estabelecida.

A massa de pó acumulada por unidade de área (W), para cada frequência testada, é apresentada na Figura 4.2. Percebeu-se que as frequências de 5, 6, 10, 19, 20 e 21 Hz forneceram maior massa de pó acumulada por unidade de área quando comparadas ao sistema estático (f: 0 Hz). As frequências de 7 e 18 Hz resultaram em testes que forneceram aproximadamente a mesma massa de pó depositada por unidade de área que o sistema estático.

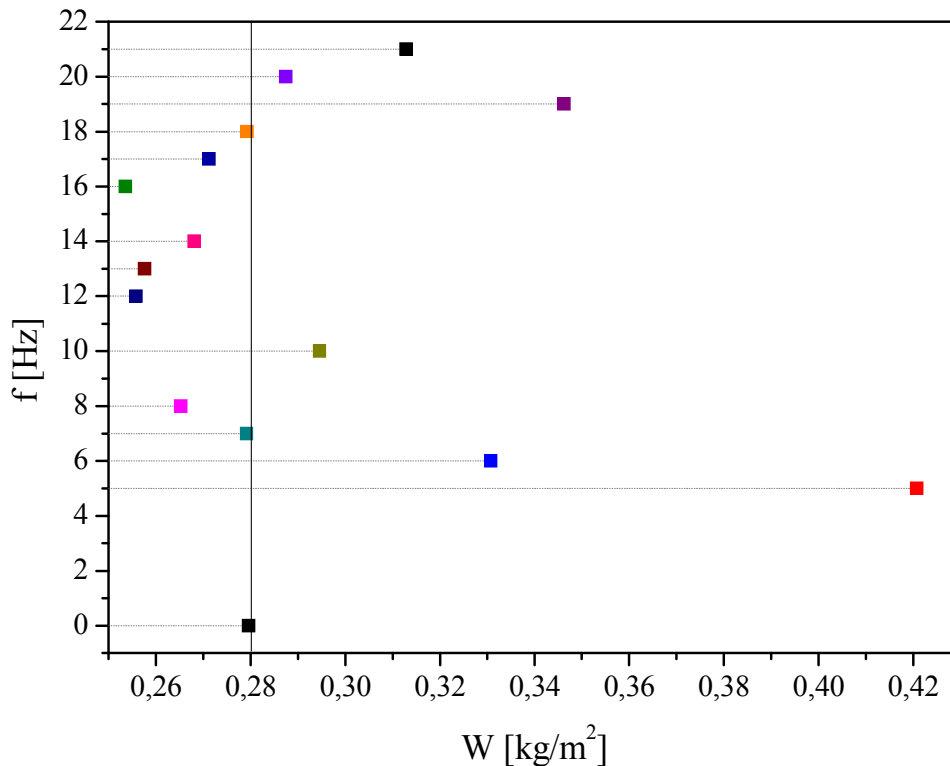


Figura 4.2 – Massa acumulada de rocha fosfática moída por unidade de área para cada frequência de vibração.

A Figura 4.3 apresenta a porosidade da torta de filtração formada sob a influência de cada frequência de vibração. A porosidade foi calculada pela Equação de Ergun.

Na Figura 4.3, a linha contínua horizontal aponta o valor da porosidade da torta ($\varepsilon = 0,67$) formada no sistema com ausência de vibração mecânica (0 Hz). Pode-se observar que as tortas formadas sob a influência das frequências de vibração de 5, 6, 7, 8, 12, 13, 19 e 20 Hz apresentam maiores porosidades, em relação à torta formada no sistema estático.

A relação entre a frequência de vibração e a amplitude do sistema é mostrada na Figura 4.4, através da qual se nota que a amplitude, até a frequência de 16 Hz, varia em até 1 mm entre duas frequências consecutivas (12 e 13 Hz).

Já entre as frequências de 16 e 17 Hz ocorreu um decaimento de 1,75 mm, o que indica que nessa faixa de oscilação, a alta velocidade do motor, no período de um ciclo de vibração, impediu que a haste em contato com o excêntrico do motor percorresse toda a sua folga.

Observou-se que para as frequências de 19, 20 e 21 Hz, a amplitude manteve-se constante.

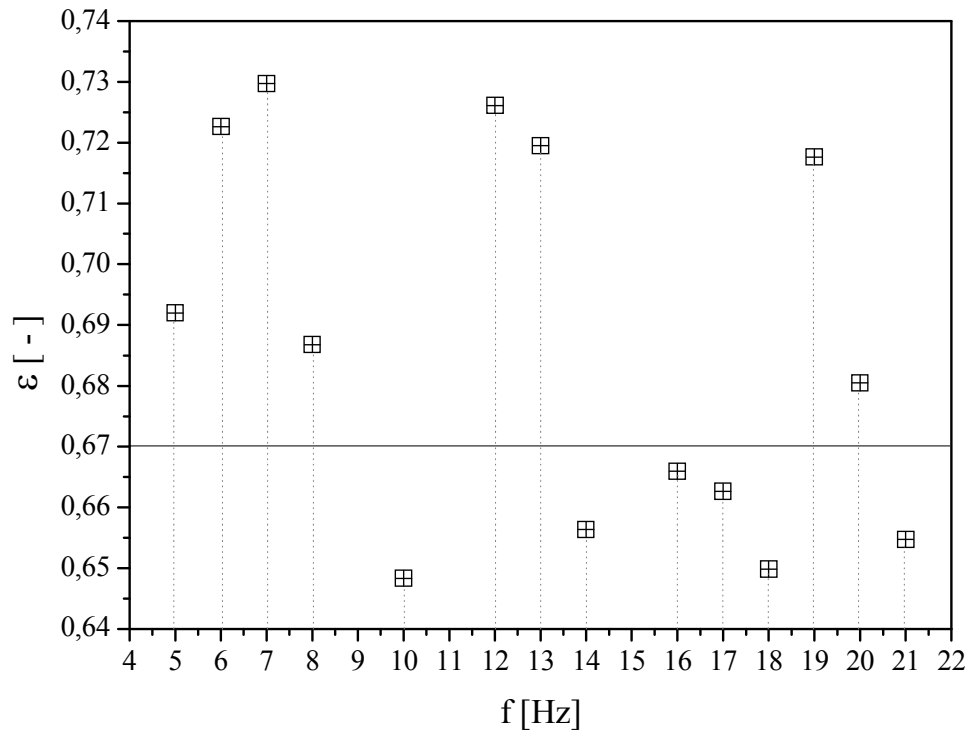


Figura 4.3 – Porosidade da torta formada sob a influência de diferentes frequências de vibração.

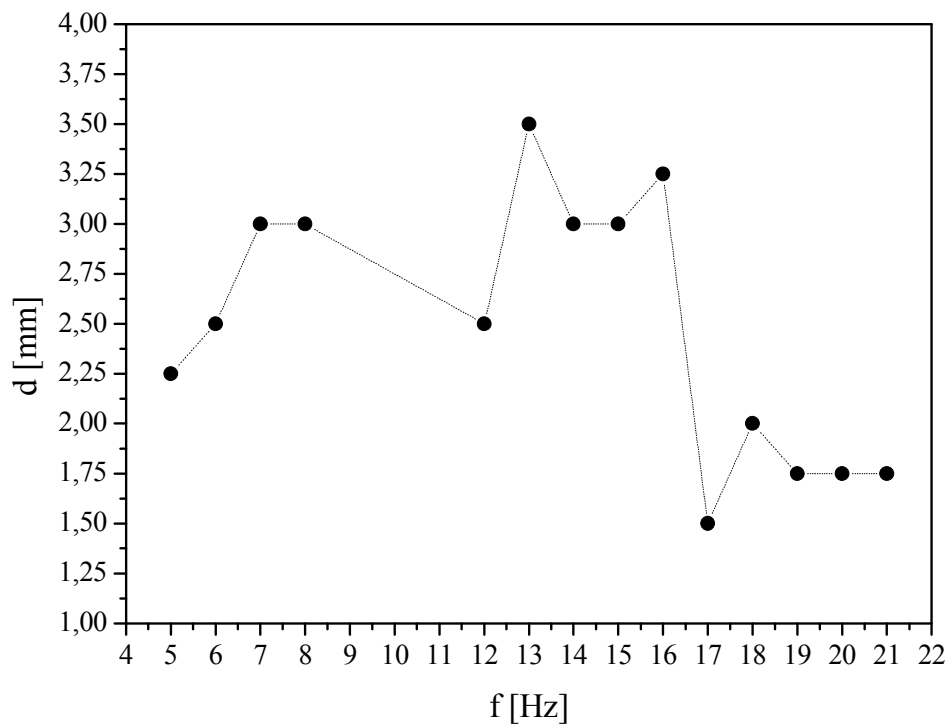


Figura 4.4 – Amplitude do movimento oscilatório para cada frequência de vibração.

A amplitude do movimento oscilatório imposto ao sistema foi medida usando-se o método gráfico, o qual consistia no acoplamento de uma caneta na bancada de apoio do filtro de acrílico. Devido à forma como o sistema foi construído, a vibração do motor provocava um movimento oscilatório na direção vertical. Sendo assim, o “traço” feito pela caneta foi medido, e a metade de seu comprimento, dada como a amplitude provocada por determinada frequência de vibração.

Comparando-se a curva de filtração de cada experimento feito, em diferentes frequências, foi possível perceber uma relação entre as frequências de 0 e 19 Hz, 5 e 20 Hz, 6 e 12 Hz, 7 e 13 Hz e 14 e 18 Hz, conforme ilustrado na Figura 4.5. Isso leva a crer que o movimento periódico do motor é composto por séries de movimentos harmônicos simples, sendo cada um desses movimentos descritos por uma função senoidal (NSK, 2004). Assim, uma frequência baixa, como por exemplo 5 Hz, leva os resultados a um ajuste semelhante ao ajuste dos resultados obtidos a partir de uma frequência de 20 Hz.

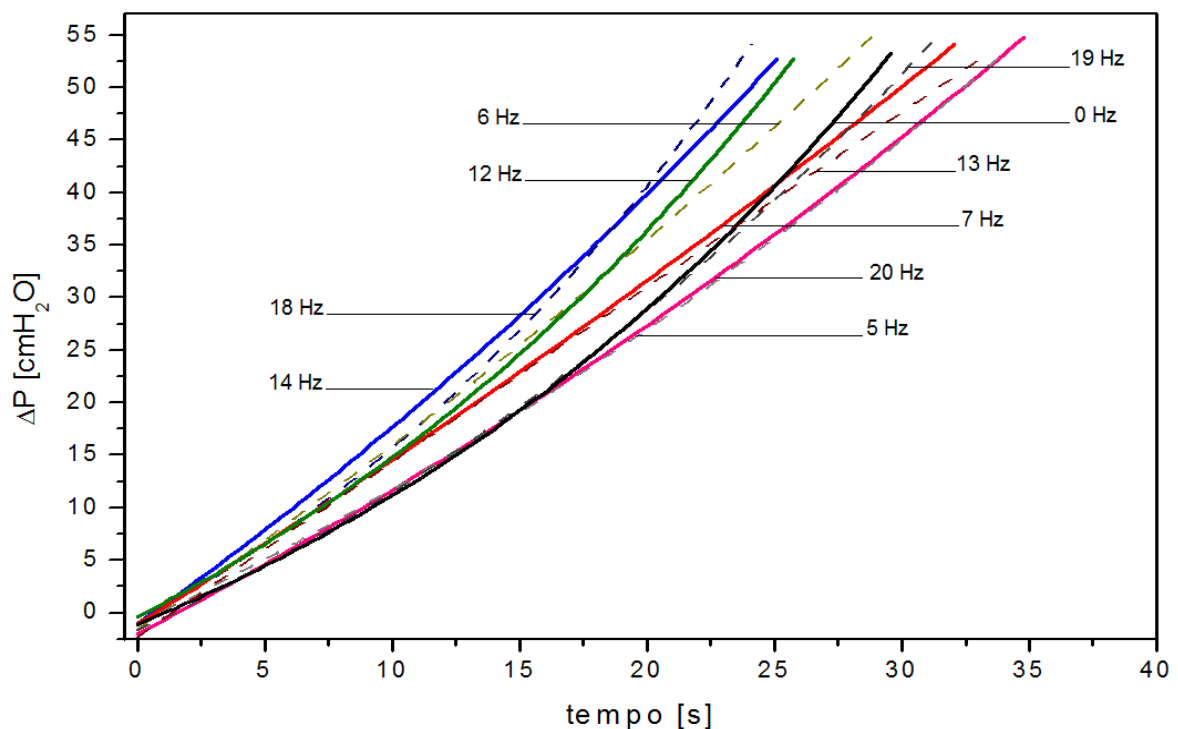


Figura 4.5 – Ajuste das frequências em relação ao tempo de filtração.

Os resultados obtidos nos testes preliminares determinaram os procedimentos para a sequência do trabalho. A única relação observada entre as frequências de vibração estava, inicialmente, relacionada ao funcionamento do motor excêntrico. Não se verificou nenhuma relação entre a frequência de vibração e as respostas almejadas nesta etapa: tempo de

filtração, massa de pó acumulada por unidade de área e porosidade. Nesse contexto, decidiu-se avaliar as frequências de vibração por faixas de intensidade: baixa, média e alta, conforme o exposto na Seção 4.2.

4.2. Avaliação de três faixas de frequência de vibração: baixa, média e alta

Nessa etapa foi utilizada a rocha fosfática moída como material pulverulento. Os testes foram feitos em filtros sintéticos de poliéster (PE), com queda de pressão máxima de 4903 Pa, velocidade de filtração de 10 cm/s e vazão de alimentação de 0,183 g/s.

Foram avaliadas 3 frequências de vibração baixas (5, 6 e 7 Hz), 3 frequências médias de vibração (12, 13 e 14 Hz) e 3 frequências altas de vibração (18, 19 e 20 Hz). Todos esses testes foram comparados com os resultados obtidos pelo sistema estático, no qual o processo de filtração ocorreu na ausência de frequência de vibração (0 Hz).

O resultado para o teste estático é apresentado na Figura 4.6.

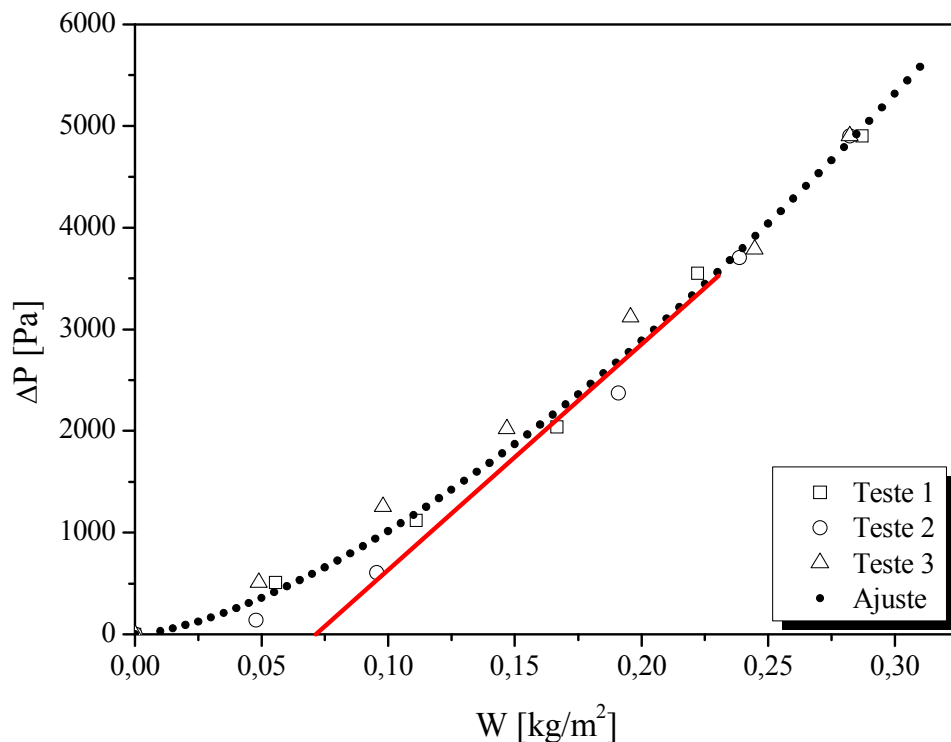


Figura 4.6 – Ajuste para a curva de filtração (f: 0 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

Para o teste estático, conforme a Figura 4.6, a massa acumulada por unidade de área (W), necessária para que o sistema alcançasse a máxima queda de pressão estabelecida, foi de $0,3 \text{ kg/m}^2$.

A Figura 4.6 também mostra o ponto de colmatação, que segundo Walsh (1996) é o ponto na abscissa obtido pelo prolongamento da parte linear da curva de filtração. O ponto de colmatação indica o momento em que a torta de filtração começa a se formar. Para o teste estático, a massa de material particulado necessária para formar a torta foi de aproximadamente 0,074 kg/m².

As Figuras 4.7 a 4.9 apresentam o ajuste para a curva de filtração, para as réplicas, nas frequências de 5, 6 e 7 Hz, no filtro de poliéster. Os parâmetros dos ajustes estão expostos no Apêndice A.

Nota-se, na Figura 4.7, que foi necessário o acúmulo de 0,270 kg/m² de material particulado sobre o tecido para que fosse alcançada a variação máxima de pressão equivalente à coluna de 50 cm de H₂O (4903 Pa), no experimento com vibração de 5 Hz.

Na Figura 4.8, para se alcançar a máxima queda de pressão do experimento com frequência de vibração de 6 Hz, foi necessário o acúmulo de 0,300 kg/m² de material pulverulento sobre o meio filtrante.

Já na Figura 4.9, que mostra a curva de filtração do ensaio realizado com vibração de 7 Hz, a massa total de pó acumulada por unidade de área foi de 0,320 kg/m².

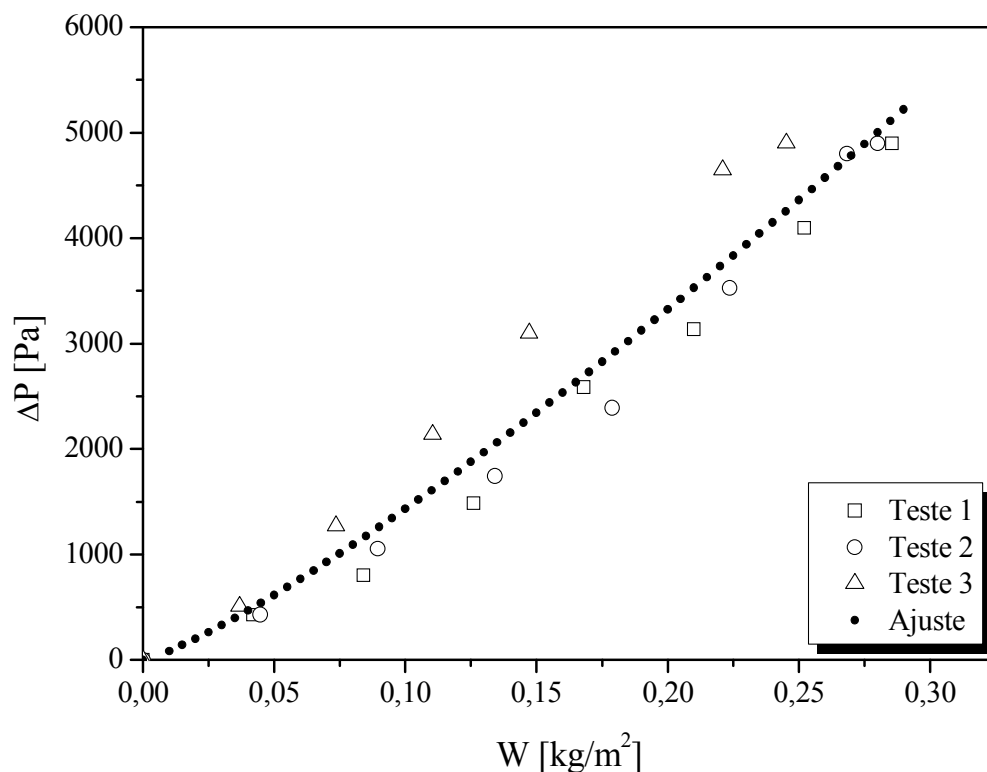


Figura 4.7 – Ajuste para a curva de filtração (f: 5 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

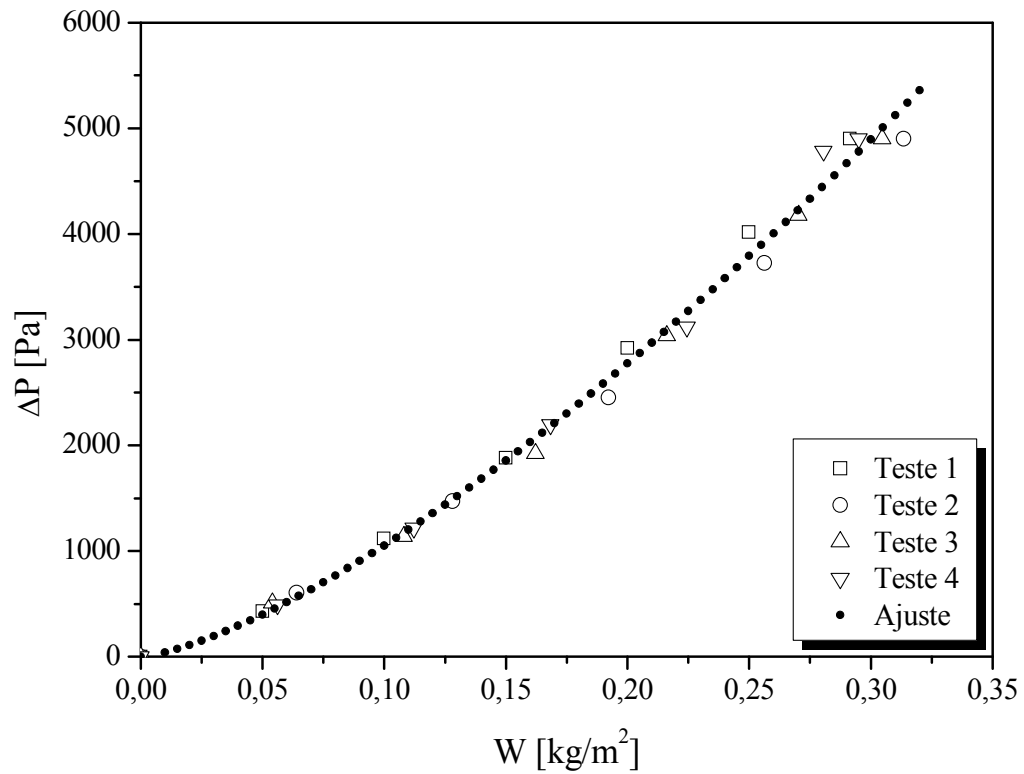


Figura 4.8 – Ajuste para a curva de filtração (f: 6 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

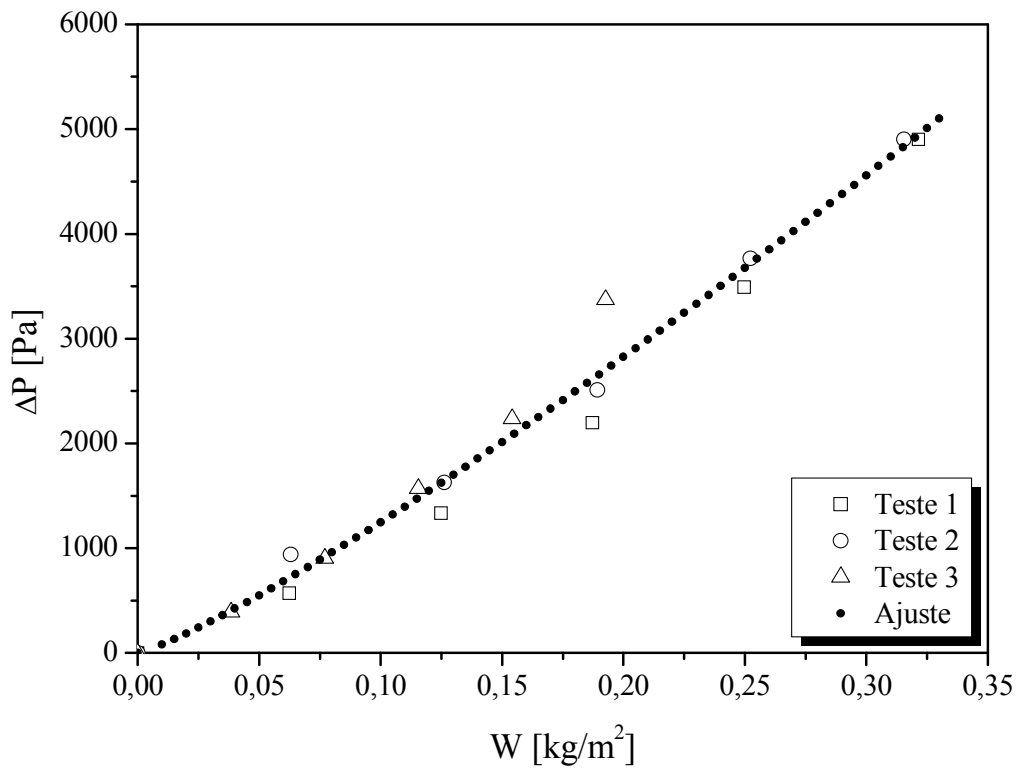


Figura 4.9 – Ajuste para a curva de filtração (f: 7 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

Observa-se nos testes com as três frequências baixas de vibração (5, 6 e 7 Hz), bem como no teste estático, que a concavidade da curva de filtração foi para cima. Isso representa um ciclo de filtração com formação mais lenta da torta de filtração, indicando um maior período da etapa de filtração de profundidade (AZEVEDO, 2009).

Na Figura 4.10, os pontos de colmatação para as curvas de filtração dos ensaios com 5, 6 e 7 Hz, são apresentados. Notou-se que foi necessária uma mesma carga mássica (W) para se iniciar a formação da torta de filtração nos ensaios com frequências de vibração de 5 e 7 Hz. Já para a vibração de 6 Hz houve um aumento na carga mássica necessária para que a torta de filtração começasse a se formar, aproximando-se do valor do ponto de colmatação obtido no sistema estático. Comparando-se os testes com baixa frequência de vibração e o teste estático, verifica-se que foi necessária uma maior massa acumulada de material particulado por unidade de área para que a torta começasse a se formar no sistema estático e vibrando a 6 Hz. Isso indica que a vibração contínua com frequência de 5 e 7 Hz, concomitante ao processo de filtração, nas condições experimentais estabelecidas, provavelmente proporcionou um rearranjo na acomodação das partículas no interior do tecido, o que acelerou sua saturação, em relação à operação convencional de filtração (sistema estático).

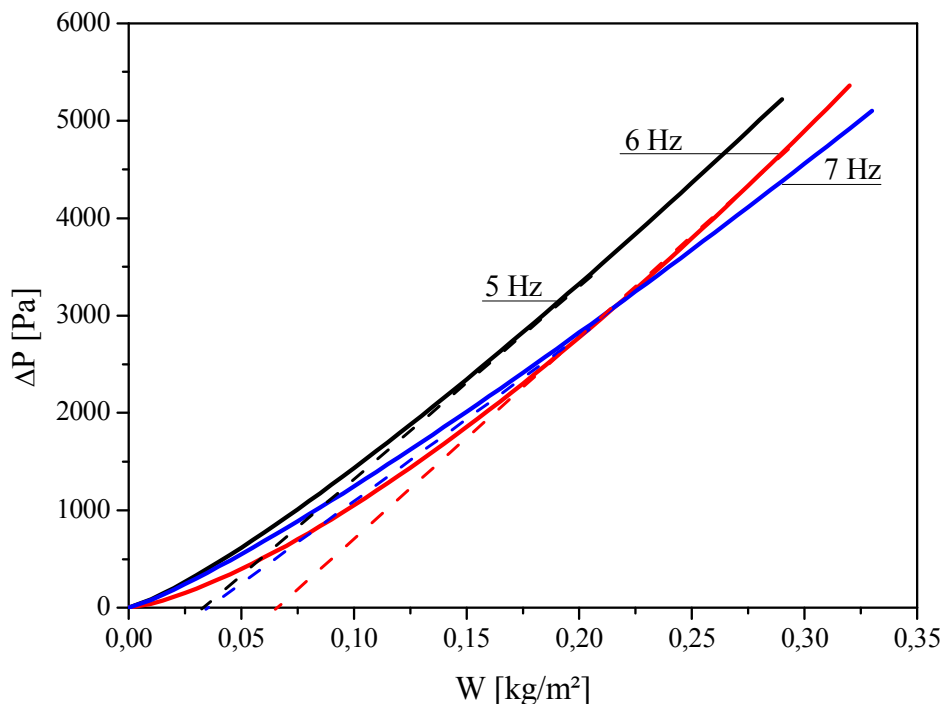


Figura 4.10 – Ponto de colmatação indicado na curva de filtração (f: 5, 6 e 7 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

As Figuras 4.11 a 4.13 apresentam o ajuste da curva de filtração para as tréplicas, nas frequências de 12, 13 e 14 Hz, no filtro de poliéster. Os parâmetros dos ajustes estão expostos no Apêndice A.

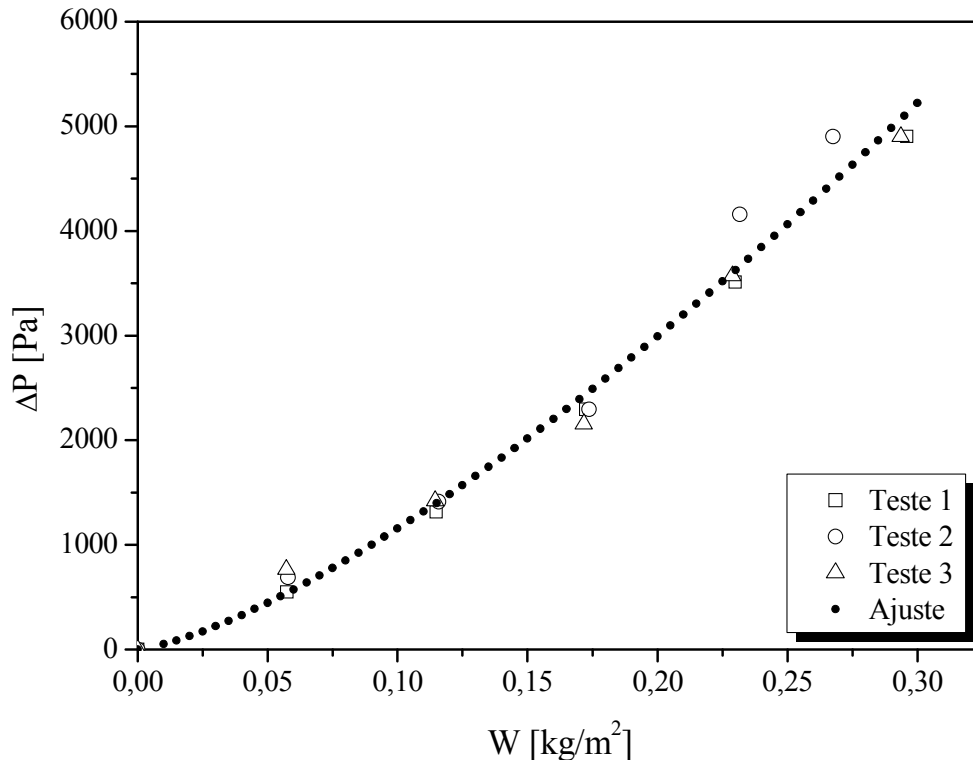


Figura 4.11 – Ajuste da curva de filtração (f: 12 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

De acordo com a Figura 4.11, que foi necessário o acúmulo de $0,280 \text{ kg/m}^2$ de material particulado sobre o tecido para que fosse alcançada a variação máxima de pressão de 4903 Pa no experimento com vibração de 12 Hz.

Na Figura 4.12, para se alcançar a máxima queda de pressão do experimento com frequência de vibração de 13 Hz, foi necessário o acúmulo de $0,310 \text{ kg/m}^2$ de material pulverulento sobre o meio filtrante.

Já na Figura 4.13, que mostra a curva de filtração do ensaio realizado com vibração de 14 Hz, a massa total de pó acumulada por unidade de área foi de $0,260 \text{ kg/m}^2$.

Observou-se nos testes com as três frequências médias de vibração (12, 13 e 14 Hz) que, assim como nos testes de baixas frequências de vibração e no teste estático, a concavidade da curva de filtração também foi para cima, o que representa um ciclo de filtração com maior período da etapa de filtração de profundidade (AZEVEDO, 2009).

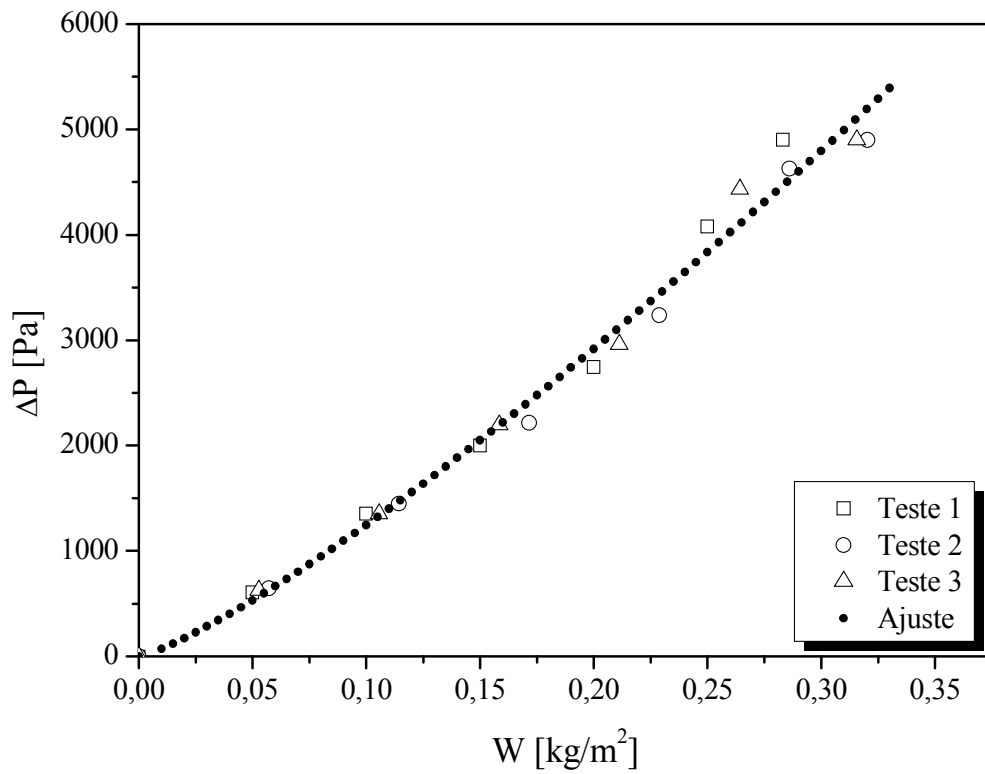


Figura 4.12 – Ajuste da curva de filtração (f : 13 Hz); $\Delta P = 4903 \text{ Pa}$.

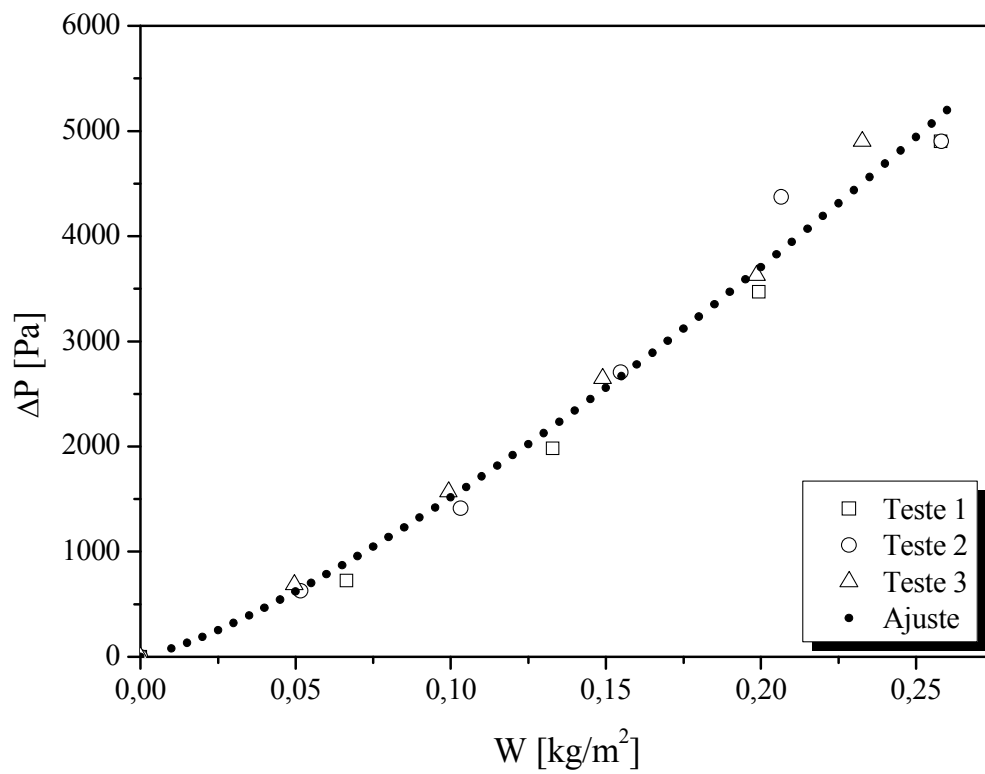


Figura 4.13 – Ajuste da curva de filtração (f : 14 Hz); $\Delta P = 4903 \text{ Pa}$.

A Figura 4.14 mostra os pontos de colmatação para as curvas de filtração dos ensaios com 12, 13 e 14 Hz.

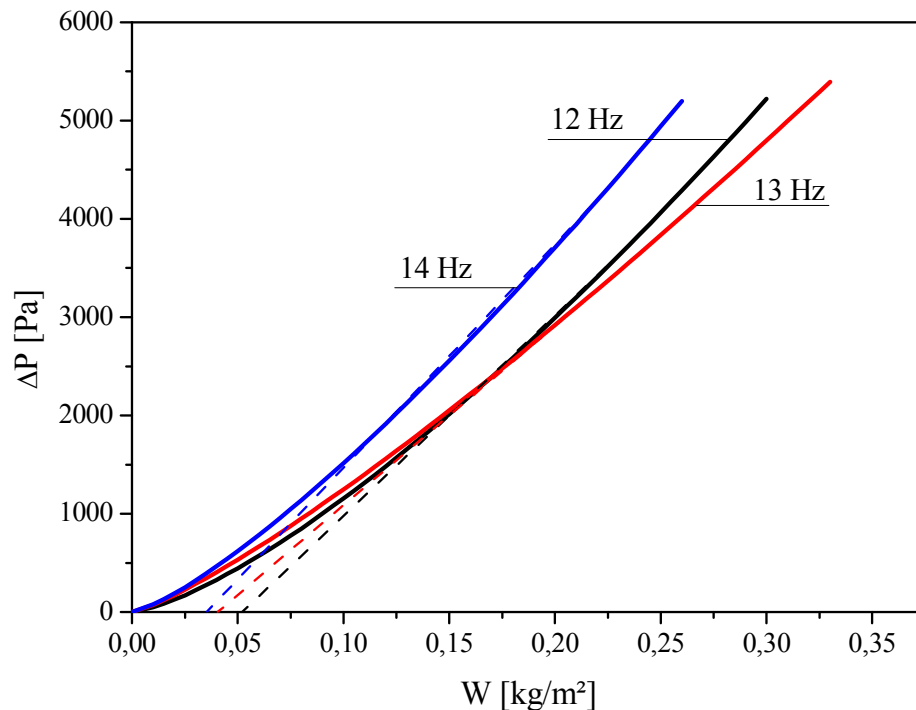


Figura 4.14 – Ponto de colmatação indicado na curva de filtração (f: 12, 13 e 14 Hz);
 $\Delta P=4903$ Pa.

Observou-se na Figura 4.14 que para as três frequências médias analisadas, a carga mássica necessária à formação inicial da torta se manteve na faixa da carga mássica dos ensaios com baixas frequências, ou seja, abaixo do valor obtido para o sistema estático (Figura 4.6). Tal fato provavelmente sinaliza que a vibração provocou uma acomodação nas partículas no interior do meio filtrante, de maneira que elas preencheram os espaços vazios entre as fibras, acarretando uma saturação mais rápida do filtro.

As Figuras 4.15 a 4.17 apresentam o ajuste da curva de filtração para as réplicas, nas frequências de 18, 19 e 20 Hz, no filtro de poliéster. Os parâmetros dos ajustes estão expostos no Apêndice A.

Nota-se, na Figura 4.15, que foi necessário o acúmulo de médio de $0,280 \text{ kg/m}^2$ de material particulado sobre o tecido para que fosse alcançada a variação máxima de pressão equivalente à coluna de 50 cm de H_2O (4903 Pa), no experimento com vibração de 18 Hz.

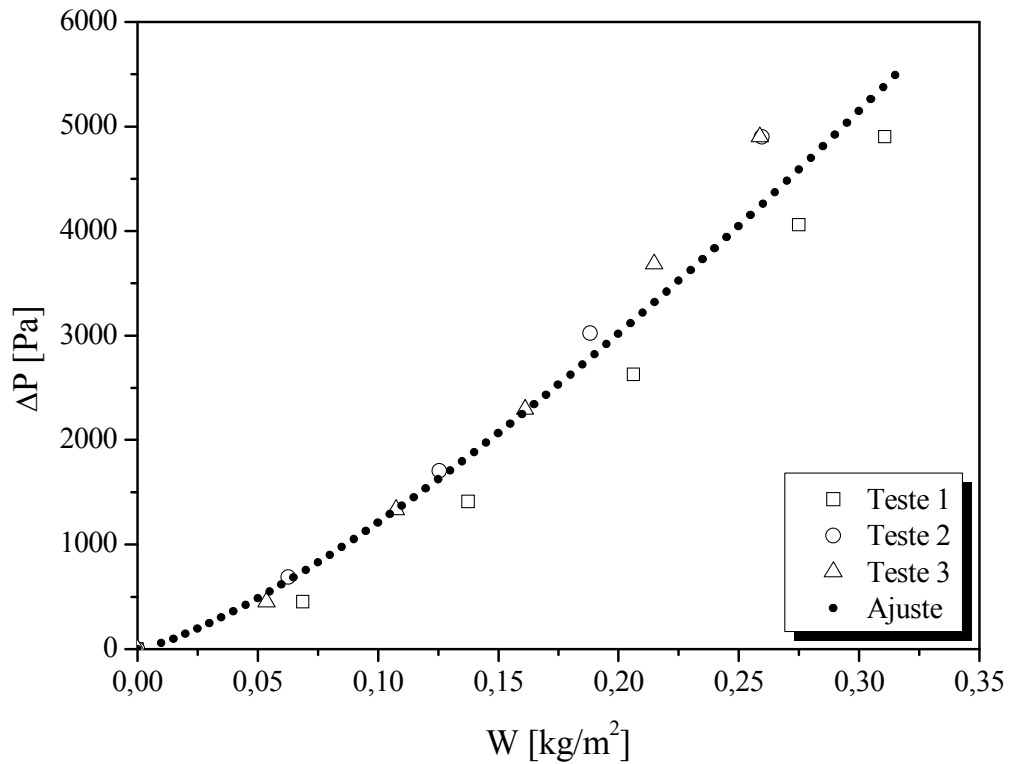


Figura 4.15 – Ajuste da curva de filtração (f: 18 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

Na Figura 4.16, para se alcançar a máxima queda de pressão do experimento com frequência de vibração de 19 Hz, foi necessário o acúmulo de $0,280 \text{ kg/m}^2$ de material pulverulento sobre o meio filtrante.

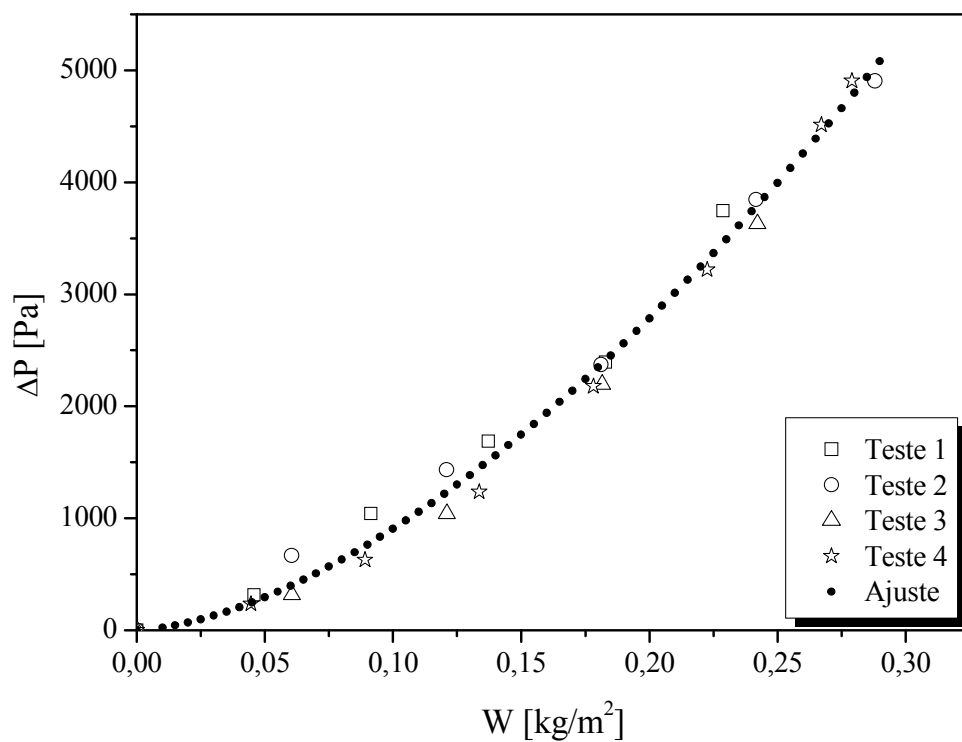


Figura 4.16 – Ajuste da curva de filtração (f: 19 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

Já na Figura 4.17, que mostra a curva de filtração do ensaio realizado com vibração de 20 Hz, a massa total de pó acumulada por unidade de área foi de 0,350 kg/m².

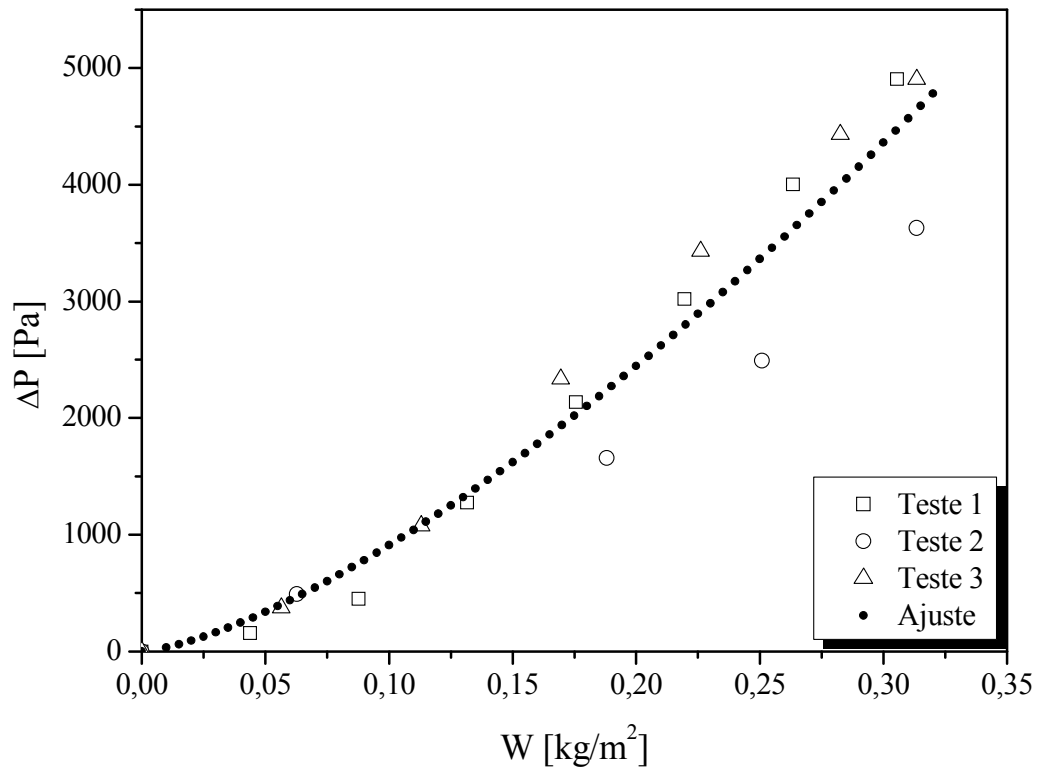


Figura 4.17 – Ajuste da curva de filtração (f: 20 Hz); $\Delta P=4903$ Pa.

Observa-se nos testes com as três frequências altas de vibração (18, 19 e 20 Hz) que, assim como nos outros testes com baixas e médias frequências de vibração, a concavidade da curva de filtração foi para cima, o que significou que a torta de filtração se formava mais lentamente.

A Figura 4.18 mostra os pontos de colmatação para as curvas de filtração dos ensaios com 18, 19 e 20 Hz.

Pode-se observar na Figura 4.18, que a carga mássica necessária à formação inicial da torta, para a frequência de 19 Hz, foi em torno de 0,076 kg/m², se aproximando do valor obtido no teste estático (Figura 4.6). Isso sugere que os resultados obtidos nos testes realizados com frequência de 19 Hz tem o mesmo comportamento que os testes realizados com o sistema estático. Assim, também, ocorre com as frequências de 6 e 12 Hz, sendo que ambas apresentaram ponto de colmatação com valor de 0,050 kg/m². Isso leva à conclusão de que a observação feita anteriormente, na etapa preliminar, em que o movimento periódico do motor seria composto por séries de movimentos harmônicos simples, sendo cada um desses

movimentos descritos por uma função senoidal, seria verdadeira. A carga mássica necessária para o início da formação da torta para as frequências de 18 e 20 Hz, foi menor que a carga mássica obtida nos ensaios com o sistema estático.

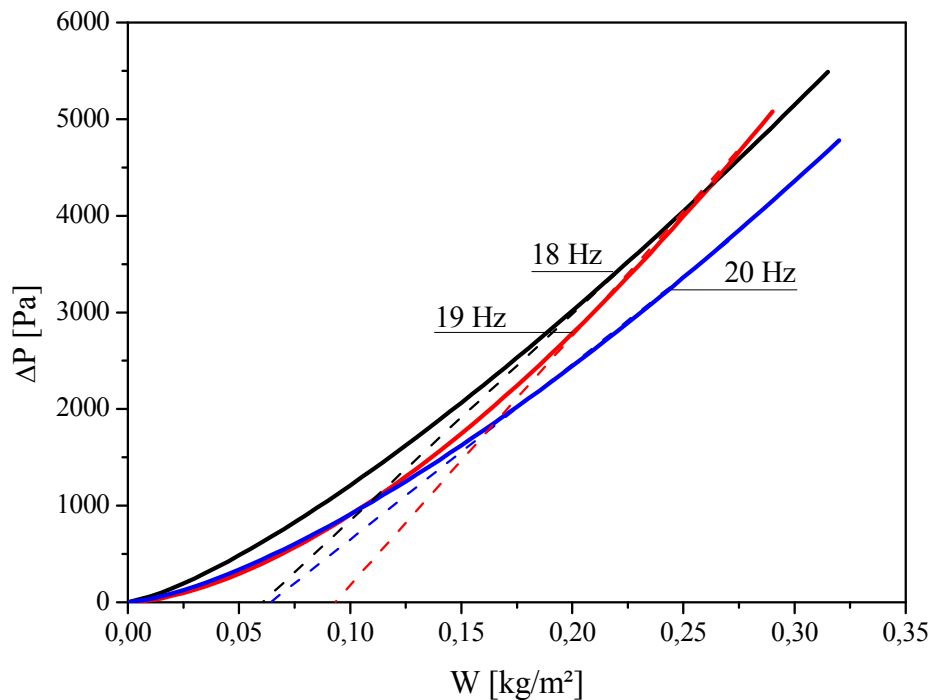


Figura 4.18 – Ponto de colmatação indicado na curva de filtração (f: 18, 19 e 20 Hz);
 $\Delta P=4903$ Pa.

A partir desse ponto, os experimentos foram realizados em três frequências de vibração escolhidas, além do teste com 0 Hz. A escolha da frequência de 19 Hz para conduzir os testes em alta frequência foi devida à fragilidade estrutural do sistema (filtro em material acrílico) quando submetido a frequências maiores (20, 21 Hz), o que poderia provocar rachaduras, e, conseqüentemente, vazamento durante os testes. Então, para avaliar o sistema submetido a altas frequências de vibração nos testes seguintes, foi escolhida a frequência mais alta que também ofereceria segurança na execução dos próximos testes. Partindo de 19 Hz, as outras frequências de estudo foram escolhidas em intervalos de 6 Hz, sendo a faixa de frequências médias representada pela frequência de vibração de 13 Hz e, a faixa de baixas frequências representada pela frequência de 7 Hz. Assim, as frequências de estudo foram fixadas em 0, 7, 13 e 19 Hz.

A Figura 4.19 mostra a evolução da espessura da torta de filtração nos ensaios com frequências de 0, 7, 13 e 19 Hz. A espessura das tortas foi calculada pelo uso da Equação (2.2).

Observa-se na Figura 4.19 que a espessura das tortas formadas no processo de filtração operando com as frequências de 0 e 19 Hz foi em média 0,05 mm mais espessa que as tortas formadas nos testes do sistema operando sob as frequências de 7 e 13 Hz, até que o sistema atingisse a queda de pressão de 3000 Pa, quando a espessura das tortas começa a se igualar para as quatro frequências de vibração. Passados 4000 Pa de diferença de pressão no filtro, as tortas formadas no sistema vibrando a 7 e a 13 Hz continuam a crescer em espessura, atingindo maiores espessuras médias finais em relação ao sistema estático e vibrando com 19 Hz de frequência.

Percebe-se, na Figura 4.19, que para a mesma queda de pressão, inicialmente as tortas mais espessas foram as dos ensaios de 0 e 19 Hz, indicando que a vibração de 7 e 13 Hz provocava um arranjo interno das partículas de maneira que estas se acomodassem, diminuindo bem a permeabilidade do filtro. Isso possibilitou a formação de tortas menos espessas no início do experimento. No entanto, ocorreu uma inversão de comportamento no fim dos experimentos, sendo a espessura final das tortas provenientes dos ensaios sob vibração de 7 e 13 Hz foram maiores que as dos experimentos sob vibração de 0 e 19 Hz.

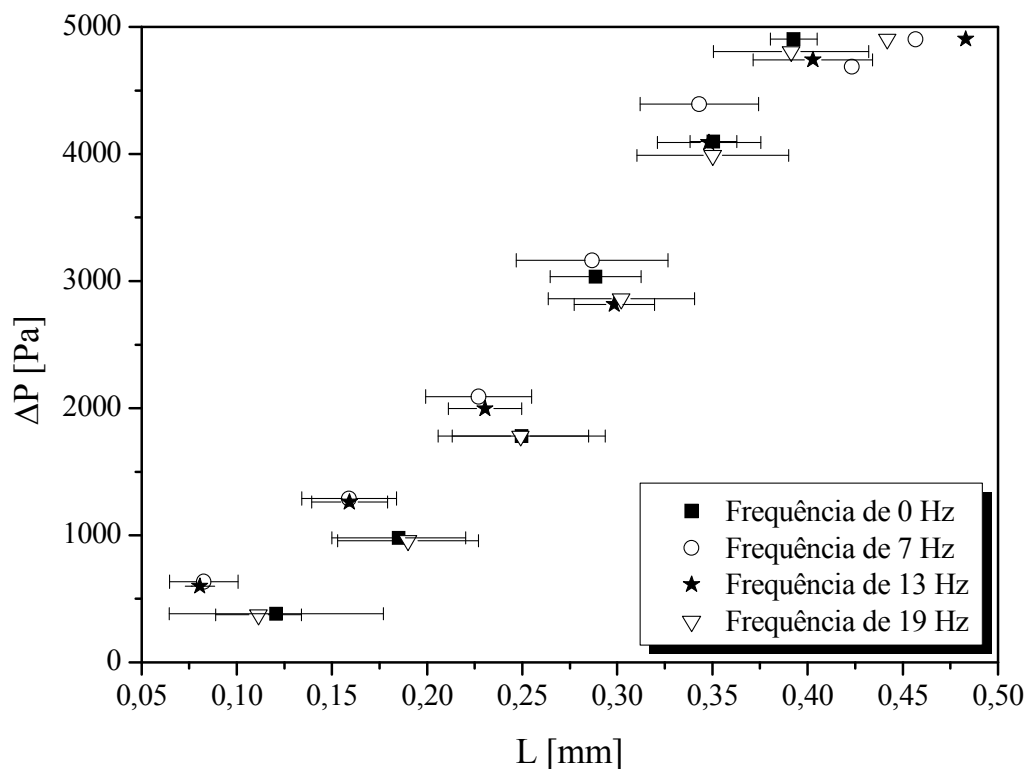


Figura 4.19 – Espessura da torta em relação à queda de pressão (f: 0, 7, 13 e 19 Hz); filtro de PE.

4.2.1 Testes com Filtro de Polipropileno

Nos testes em filtro de polipropileno (PP), avaliou-se a influência das frequências de 7, 13 e 19 Hz na resposta carga mássica acumulada por unidade de área (W). O objetivo desta etapa foi verificar se um filtro com estrutura superficial mais fechada e menor permeabilidade possibilitaria a formação de uma torta mais espessa (acúmulo de maior quantidade de pó na superfície) e, conseqüentemente, mais sensível à vibração mecânica imprimida pelo motor.

Nessa etapa foi utilizada a rocha fosfática moída como material pulverulento. Os testes foram feitos em filtros sintéticos de polipropileno (PP), com queda de pressão máxima de 4903 Pa, velocidade de filtração de 10 cm/s e vazão de alimentação de 0,183 g/s.

O resultado para o teste estático é apresentado na Figura 4.20. Para o teste estático, conforme a Figura 4.20, a massa acumulada por unidade de área (W), necessária para que o sistema alcançasse a máxima queda de pressão estabelecida, foi de 0,180 kg/m². A Figura 4.20 também mostra o ponto de colmatação, através do qual se verificou que a massa de material particulado necessária para formar a torta era de 0,025 kg/m², um valor bem menor que o ponto de colmatação do teste estático no filtro de poliéster (Figura 4.6). Tal situação indicou que o meio de poliéster foi mais permeável que o polipropileno, proporcionando àquele uma maior coleta de partículas durante o ciclo de filtração.

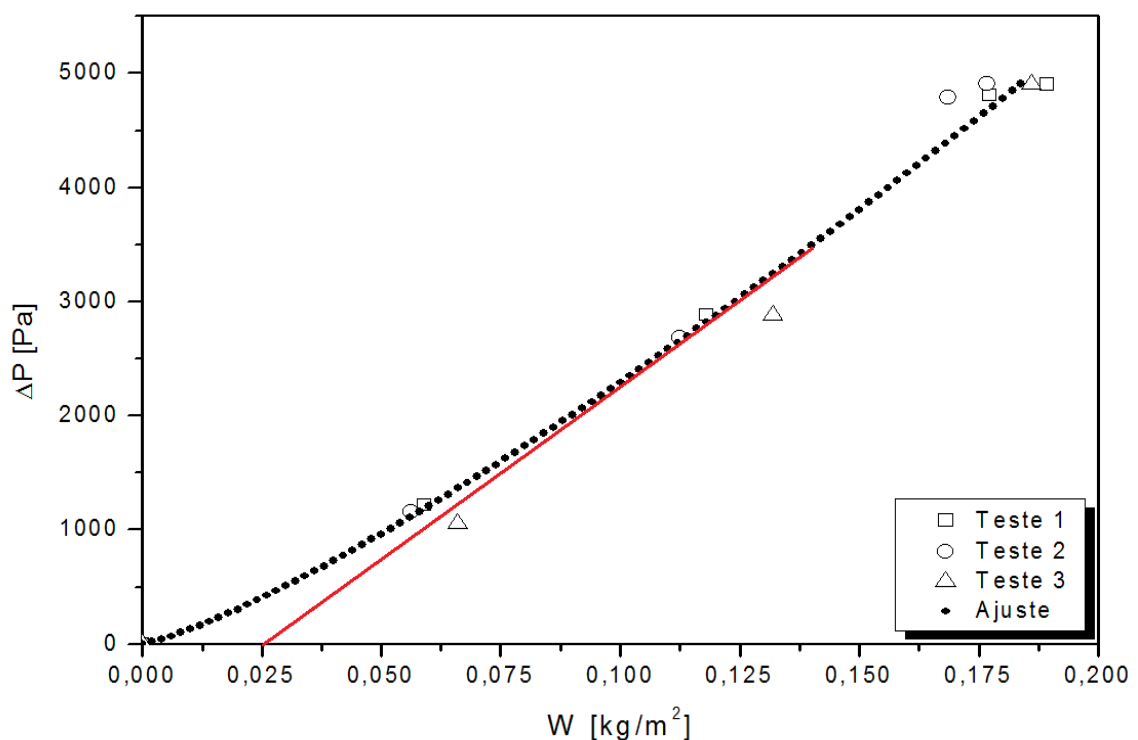


Figura 4.20 – Ajuste para a curva de filtração (f: 0 Hz); filtro de PP.

As Figuras 4.21 a 4.23 apresentam o ajuste da curva de filtração para as tréplicas, nas frequências de 7, 13 e 19 Hz, no filtro de polipropileno. Os parâmetros dos ajustes estão expostos no Apêndice A.

Pode ser visto na Figura 4.21 que foi necessário o acúmulo de médio de 0,190 kg/m² de material particulado sobre o tecido para que fosse alcançada a variação máxima de pressão de 4903 Pa, no experimento com vibração de 7 Hz.

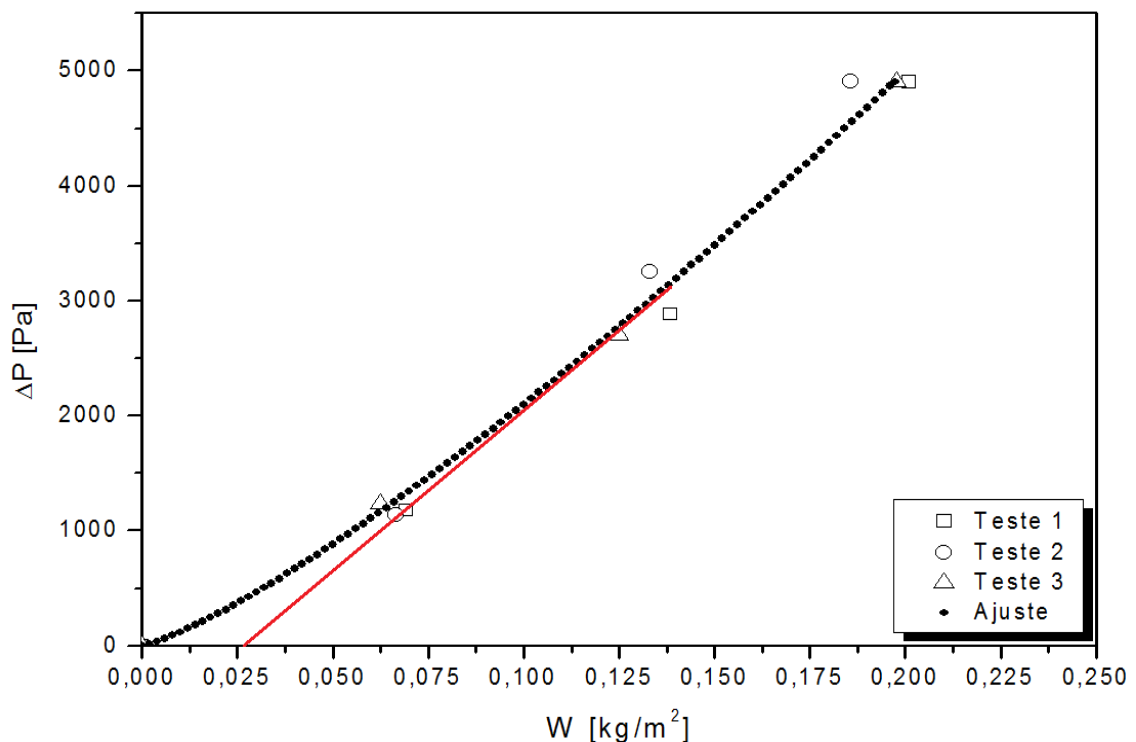


Figura 4.21 – Ajuste para a curva de filtração (f: 7 Hz); filtro de PP.

A curva de filtração da Figura 4.22 mostra que, para se alcançar a máxima queda de pressão do experimento com frequência de vibração de 13 Hz, foi necessário o acúmulo de 0,200 kg/m² de material pulverulento sobre o meio filtrante.

Pôde-se notar pela Figura 4.22 que, tanto para o teste com vibração de 7 Hz quanto para o teste com vibração de 13 Hz, o ponto de colmatação, definido como a carga mássica de pó necessária para o início da formação da torta, foi o mesmo encontrado no ensaio com o sistema estático (f: 0 Hz), com o valor de 0,025 kg/m². Isso sugere que a vibração nas frequências de 7 e 13 Hz não exerceu nenhuma influência na formação da torta sobre o filtro de polipropileno.

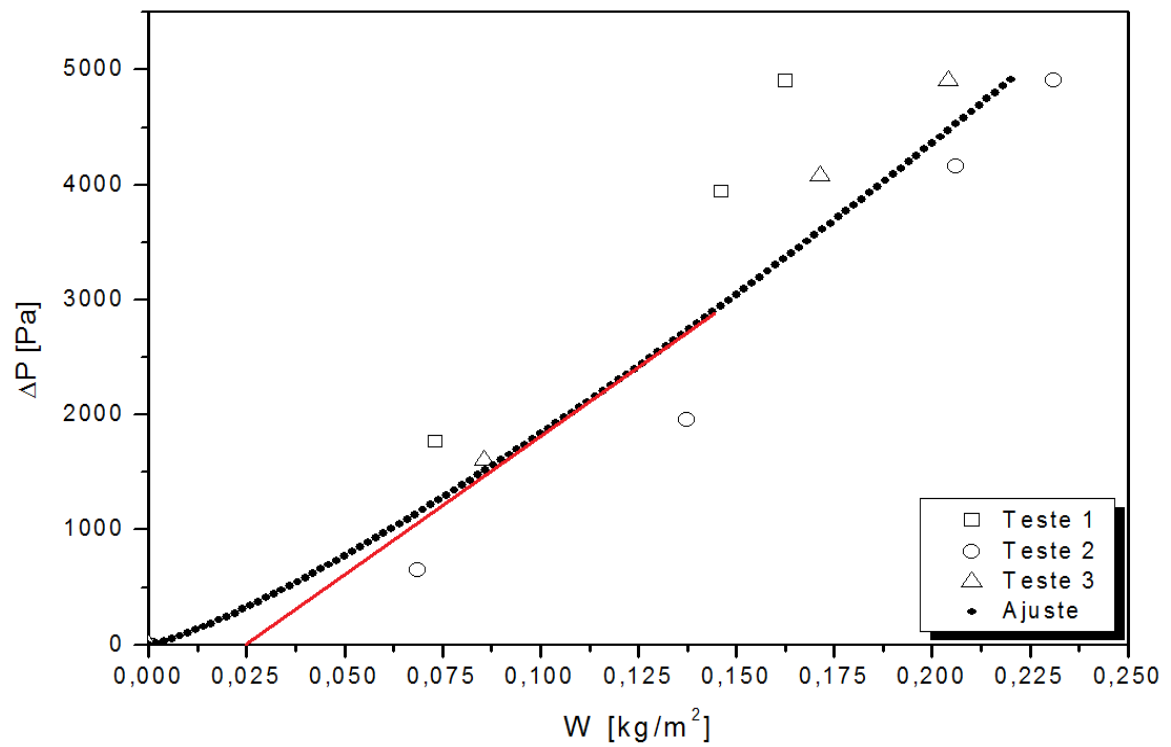


Figura 4.22 – Ajuste para a curva de filtração (f: 13 Hz); filtro de PP.

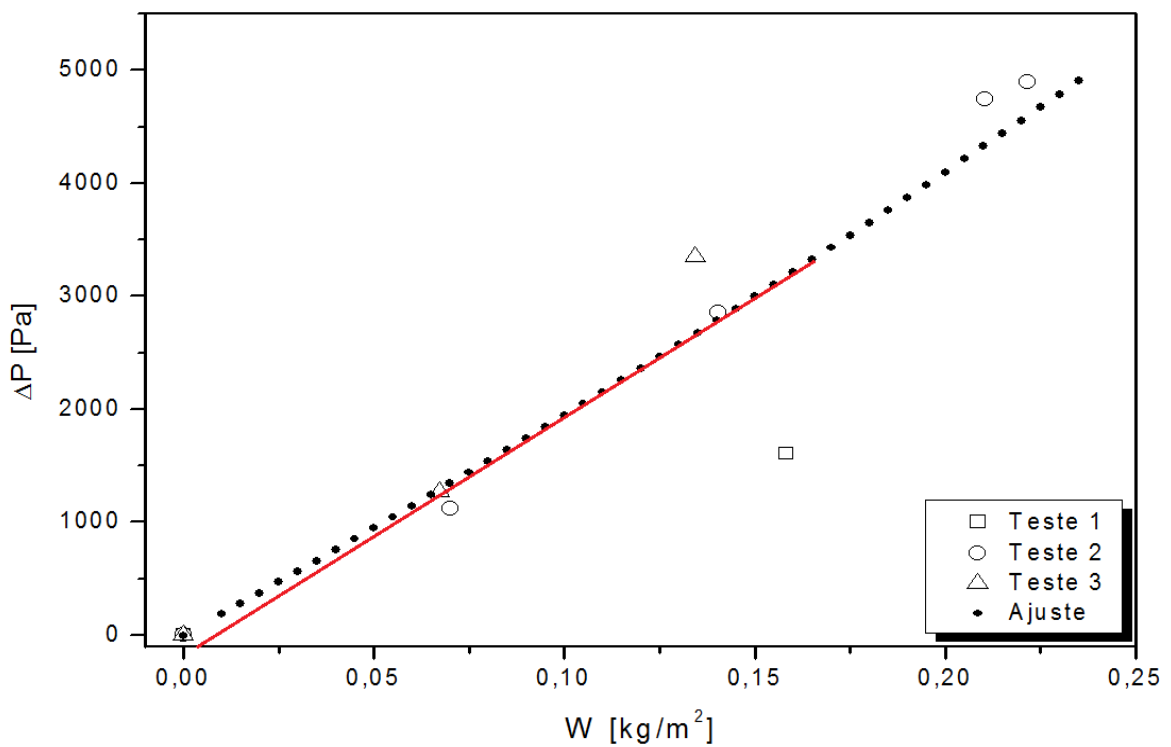


Figura 4.23 – Ajuste para a curva de filtração (f: 19 Hz); filtro de PP.

A Figura 4.23 mostra a curva de filtração do sistema operando com frequência de 19 Hz. Observa-se que o ajuste da curva de filtração quase linear, indica que, a essa frequência de vibração, ocorreu uma deposição de pó praticamente uniforme e em série na superfície do tecido, conforme Dennis (1982), apontando que há pouca penetração de pó no tecido. Isso é indicado, também, pelo ponto de colmatção, que se aproximou da origem da curva de filtração. Foi necessária uma carga mássica de 0,220 kg/m² para que a torta formada alcançasse a máxima queda de pressão de 4903 Pa.

A Figura 4.24 apresenta a espessura das tortas nos ensaios em filtro de polipropileno, em relação à queda de pressão, comparadas com a espessura das tortas formadas nos experimentos com filtro de poliéster. Pôde-se notar que as tortas formadas no filtro de polipropileno tiveram espessuras bem menores que as tortas formadas em filtro de poliéster, sendo a espessura máxima em torno de 0,17 mm no filtro de PP, contra 0,47 mm no filtro de PE, ambas as tortas formadas em ensaios submetidos à frequência de vibração de 13 Hz. Apesar da filtração no meio filtrante de polipropileno ter acentuada característica superficial, a torta não alcançou maiores espessuras que no filtro de poliéster, não tendo extensão suficiente para sentir o efeito das diferentes frequências de vibração. Como os resultados dos testes realizados em filtro de polipropileno não favoreceram uma avaliação precisa da influência de diferentes frequências de vibração no sistema de filtração gás-sólido, optou-se pelo uso do filtro de poliéster nos experimentos subsequentes.

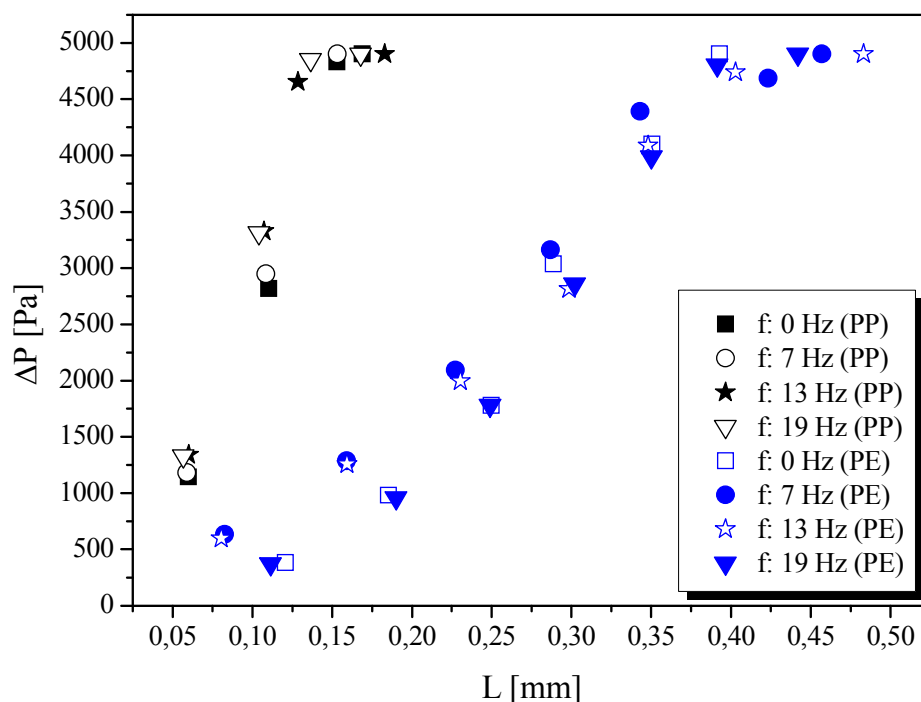


Figura 4.24 – Espessura das tortas em polipropileno (PP) e poliéster (PE).

4.3 Curvas de Filtração

Os resultados tratados nas Subseções 4.1 e 4.2, com testes realizados até a queda de pressão máxima de 4903 Pa, forneceram informações insuficientes a respeito da tendência de comportamento do sistema submetido a diferentes frequências de vibração do motovibrador acoplado à bancada do filtro de acrílico. Nessas condições, com a justificativa de que maiores tempos de filtração levariam à maior coleta de informação, uma vez que o sistema operacional não era automatizado, decidiu-se aumentar a queda máxima de pressão equivalente à coluna de 100 cm de H₂O (9806 Pa). Essa escolha aumentaria, consequentemente, os valores das respostas até então avaliadas (carga mássica total e espessura da torta de filtração) e suas respectivas precisões.

Nesta etapa foram avaliadas as curvas de filtração, a espessura, a porosidade e a resistência específica das tortas de filtração e o arraste do filtro para o sistema submetido às frequências de vibração de:

- 0, 7 e 13 Hz, para a rocha fosfática moída;
- 0 e 7 Hz para a rocha fosfática virgem;
- 0 e 7 Hz para o polvilho doce.

A partir dessa etapa, muitos ensaios experimentais seriam realizados até que se chegasse aos resultados necessários para um tratamento adequado. Assim, para poupar o sistema, prevenindo qualquer dano devido à sobrecarga de trabalho, e considerando-se que os resultados obtidos nas Seções 4.1, 4.2 e 4.3 mostram uma aproximação bastante estreita entre a frequência de 19 Hz e o sistema estático, decidiu-se não se utilizar mais a frequência de 19 Hz. Para os testes com a rocha fosfática virgem e com o polvilho doce, optou-se por utilizar-se apenas uma frequência de vibração, a fim de se realizar a comparação com o sistema estático (0 Hz). A frequência escolhida para a realização desses testes foi de 7 Hz.

4.3.1 Rocha Fosfática Moída

Os ensaios nesta etapa foram realizados em filtro de poliéster, com velocidade de filtração de 10 cm/s, vazão mássica de alimentação de material particulado de 0,183 g/s e queda máxima de pressão de 9806 Pa.

A Figura 4.25 apresenta o ajuste da curva de filtração para o resultado de seis testes realizados com o sistema estático. Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A.

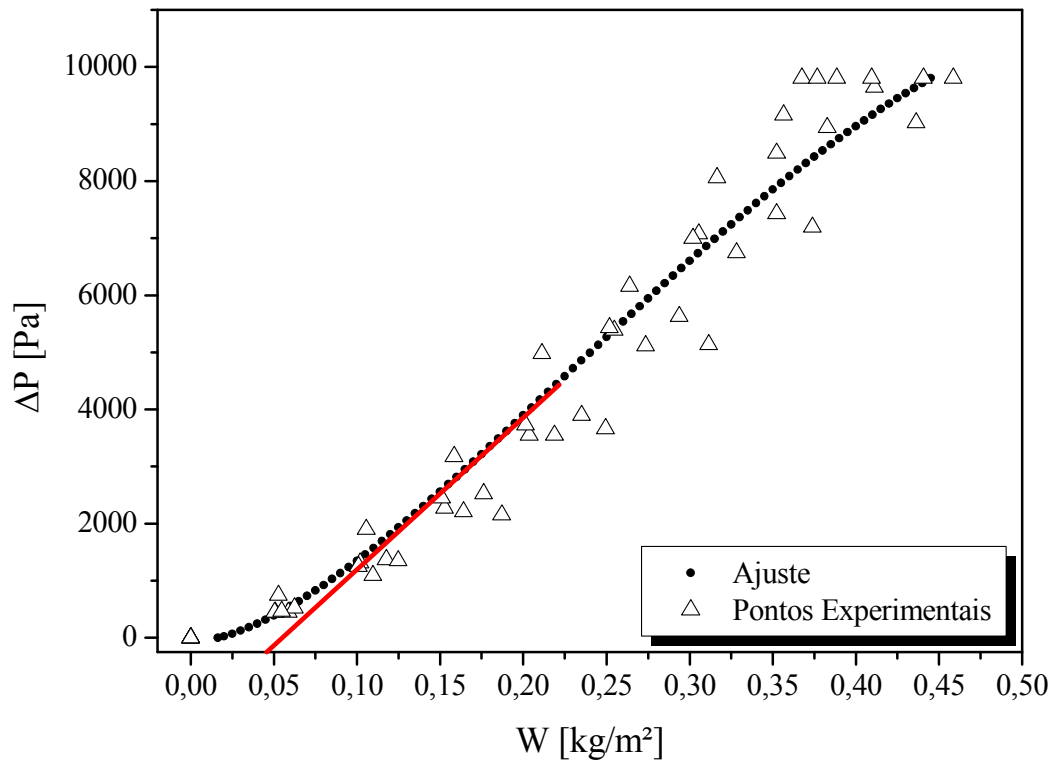


Figura 4.25 – Curva de filtração (f: 0 Hz); $\Delta P_{max}=9806$ Pa; rocha moída.

Verifica-se, na Figura 4.25, que a curva de filtração inicialmente apresentou concavidade voltada para cima, indicando, portanto, um período de filtração de profundidade. Em seguida, foi possível observar um comportamento linear, geralmente reportado na literatura como transitório (RODRIGUES, 2004), típico de uma filtração de caráter superficial.

Constata-se, no entanto, uma inversão de concavidade no final da curva de filtração. A concavidade para baixo indicou um rápido aumento da queda de pressão, ou seja, uma rápida formação da torta de filtração. A massa média total de pó acumulada por unidade de área sobre o meio filtrante, necessária para atingir a queda máxima de pressão de 9806 Pa, foi de $0,410 \text{ kg/m}^2$. O ponto de colmatação foi de $0,050 \text{ kg/m}^2$.

A Figura 4.26 mostra o ajuste da curva de filtração para o resultado de cinco testes realizados com o sistema submetido à vibração contínua com frequência de 7 Hz.

Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A.

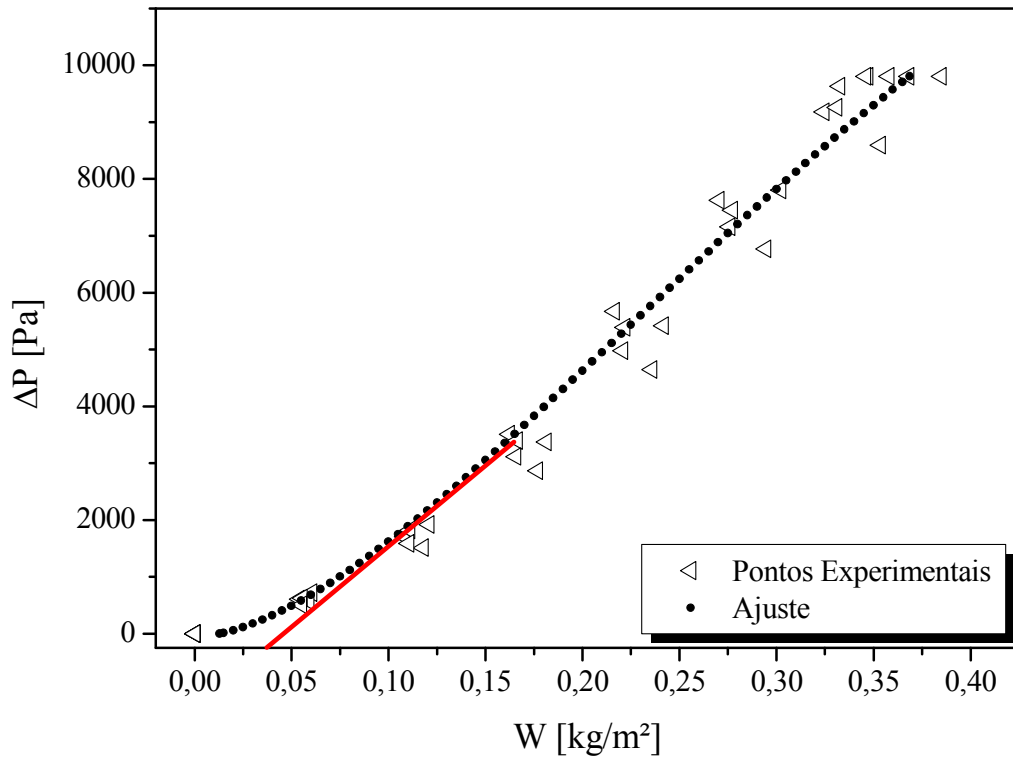


Figura 4.26 – Curva de filtração (f: 7 Hz); $\Delta P_{max}=9806$ Pa; rocha moída.

Pôde-se observar na Figura 4.26, os três comportamentos característicos da curva de filtração: inicialmente a concavidade da curva foi para baixo, o que indicou um período de filtração de profundidade; em seguida, notou-se um comportamento linear, o que apontou para uma filtração de caráter superficial e, por fim, uma inversão de curvatura, o que sinalizou uma rápida formação da torta de filtração. Foi necessária uma carga mássica média de $0,360 \text{ kg/m}^2$ para que o sistema alcançasse a queda de pressão determinada. Foi necessária uma massa acumulada de aproximadamente $0,030 \text{ kg/m}^2$ para que se iniciasse a formação da torta, sendo esse valor menor que o requerido para o sistema estático.

A Figura 4.27 apresenta o ajuste da curva de filtração para cinco testes realizados submetendo o sistema de filtração à frequência de vibração de 13 Hz. Os parâmetros do ajuste estão no Apêndice A. Observa-se na Figura 4.27 que, semelhante às curvas de filtração com o sistema estático e vibrando a 7 Hz, a curva de filtração do sistema submetido à vibração de 13 Hz também apresentou os três comportamentos característicos mencionados na literatura. Foi necessária uma carga mássica média de $0,420 \text{ kg/m}^2$ para que o sistema atingisse a máxima queda de pressão permitida ao experimento. O ponto de colmatação na condição de

operação com frequência de vibração de 13 Hz aproximou-se do valor encontrado no sistema estático, estando perto de 0,050 kg/m² de massa de material pulverulento por unidade de área.

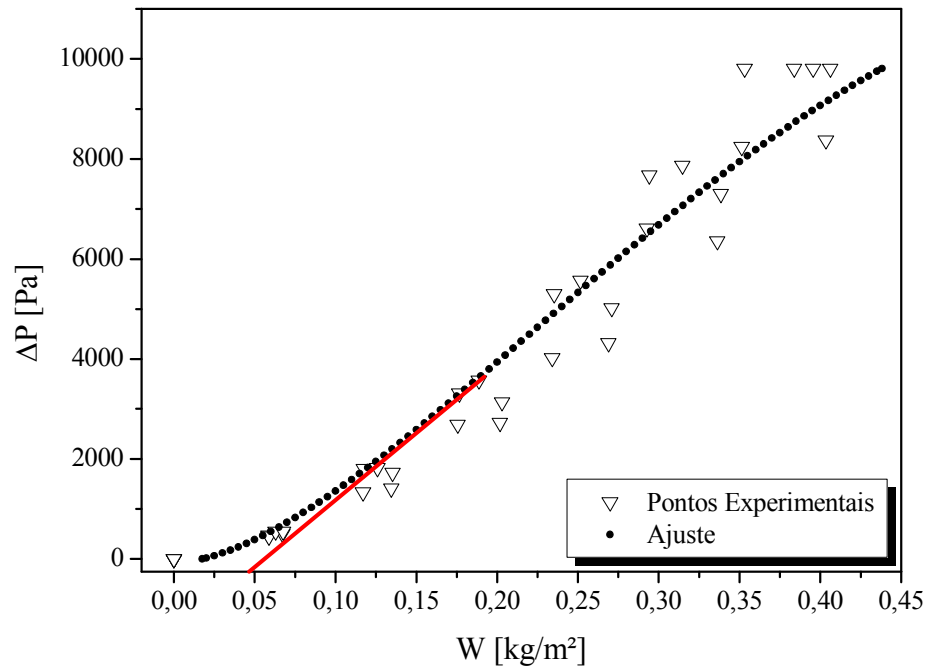


Figura 4.27 – Curva de filtragem (f. 13 Hz); $\Delta P_{max}=9806$ Pa; rocha moída.

A Figura 4.28 mostra os ajustes das curvas de filtragem para os testes com frequência de vibração de 0, 7 e 13 Hz.

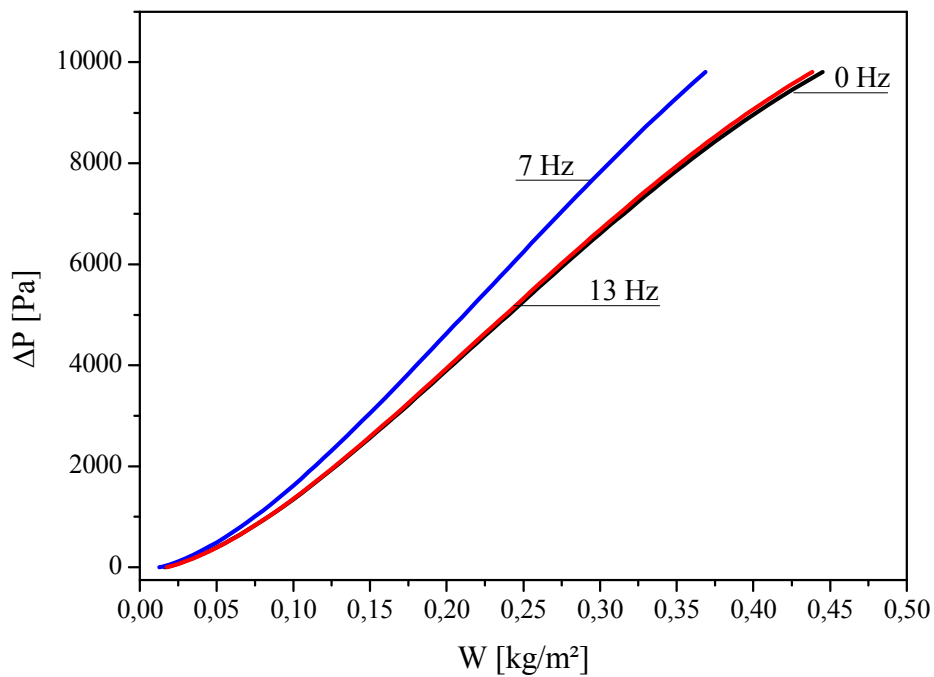


Figura 4.28 – Comparação entre as curvas de filtragem dos testes (f. 0, 7 e 13 Hz); rocha moída.

Foi possível observar, na Figura 4.28, que a curva de filtração para o experimento de 13 Hz teve o mesmo comportamento que a curva do sistema estático, tendo, ambas, o mesmo formato, o mesmo período de filtração interna (o que se refletiu no mesmo ponto de colmatação) e a mesma massa média de material particulado acumulada por unidade de área no final da filtração. Isso sugere que o sistema submetido à vibração de 13 Hz comportou-se como o sistema estático, como havia acontecido na seção anterior para a frequência de 19 Hz.

Foi realizado um tratamento estatístico sob a forma de um Teste de Hipótese, para avaliar se havia alguma diferença significativa entre os valores de massa de torta de filtração para os testes realizados com as frequências de 0, 7 e 13 Hz. A hipótese nula (H_0) foi a da igualdade das massas das tortas. A hipótese alternativa (H_1) consistiu na diferença entre as massas. O nível de significância estabelecido foi de $\alpha = 0,05$. Sendo p a probabilidade do erro, tem-se:

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

Os valores encontrados para p estão expostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Teste de Hipótese para a massa das tortas de filtração.

Frequência	P		
	0	7	13
0	-	0,0274	0,7113
7	0,0274	-	0,0701
13	0,7113	0,0701	-

Observa-se na Tabela 4.1 que apenas para a frequência de 7 Hz em relação ao sistema sem vibração, p adotou um valor menor que 0,05, demonstrando que a hipótese alternativa é verdadeira nessas condições. Então, há diferença significativa entre as massas médias totais das tortas dos experimentos com vibração de 7 Hz, em relação ao sistema estático.

Foram avaliados os comportamentos de outras respostas do processo de filtração, decorridos do uso da vibração mecânica. Para analisar se a vibração exercia alguma influência no arraste do filtro, realizou-se os cálculos utilizando-se a Equação (2.11), de maneira que foi

possível plotar a carga mássica média (W) em relação ao arraste (S), para as frequências de vibração de 0, 7 e 13 Hz, conforme se constata pela Figura 4.29.

A partir do valor aproximado de $0,100 \text{ kg/m}^2$ para a carga mássica, foi possível observar na Figura 4.29 que o arraste foi sempre maior, numa mesma carga mássica, para o sistema submetido à vibração, quando comparado com o arraste do sistema estático. Por exemplo, para uma carga mássica em torno de $0,270 \text{ kg/m}^2$, o arraste para o sistema estático é de $6 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2\text{s}$, ao passo que para o sistema submetido à vibração, o arraste era em torno de $7,7 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^2\text{s}$, ou seja, 28,33% maior que no sistema estático. Isso representou uma maior resistência do filtro quando sujeito ao efeito de vibração mecânica, em relação ao filtro operando no sistema convencional.

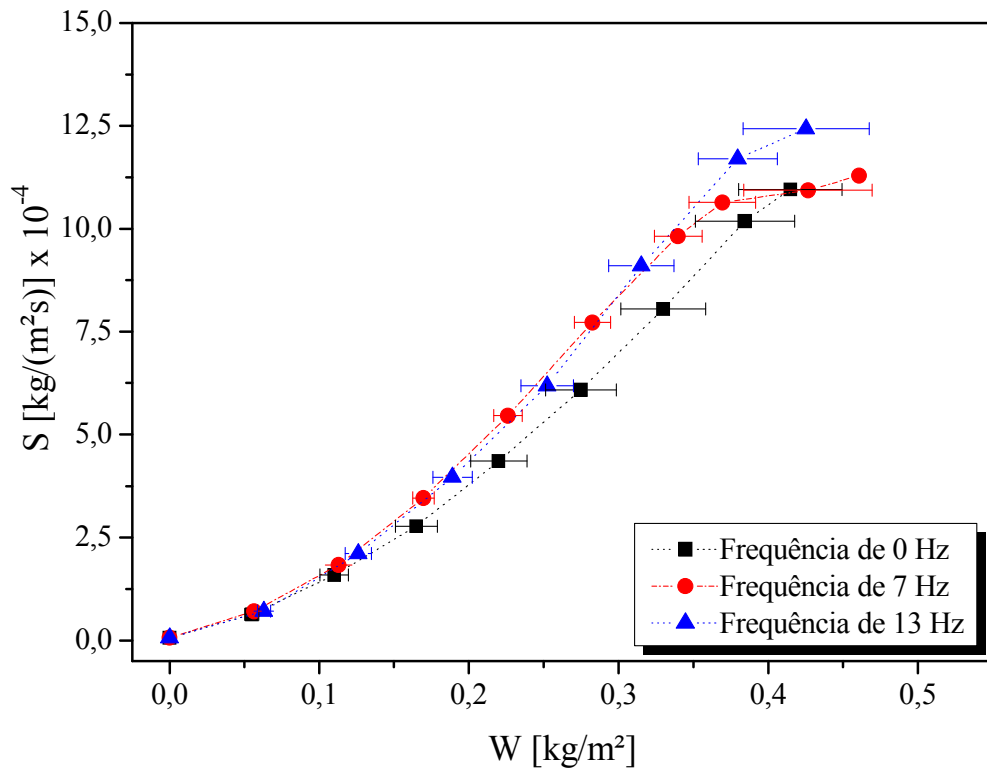


Figura 4.29 – Carga mássica por arraste (f: 0, 7, 13 Hz); rocha moída.

A relação entre a resistência específica média da torta de filtração (k_2) e a massa de material particulado acumulado por unidade de área sobre o meio filtrante (W), para os ensaios realizados com as frequências de vibração de 0, 7 e 13 Hz, é apresentada na Figura 4.30. A resistência específica da torta (k_2) foi calculada pela Equação (2.13).

Nota-se na Figura 4.30 que a torta formada sob a influência da vibração mecânica foi mais resistente que a torta formada no sistema funcionando na condição estática, para uma

mesma carga mássica sobre o tecido de filtração. Exemplificando: a resistência específica da torta com $0,225 \text{ kg/m}^2$ de massa acumulada por unidade de área teve um valor de $1,95 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ para o sistema estático, enquanto que para o sistema submetido à vibração mecânica, esse valor era de $2,4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, ou seja, 23,1% maior que no sistema sem vibração. Isso sugeriu que a vibração mecânica conduzia a um maior empacotamento das partículas no interior do meio filtrante e umas sobre as outras, o que aumentou a resistência específica da torta de filtração.

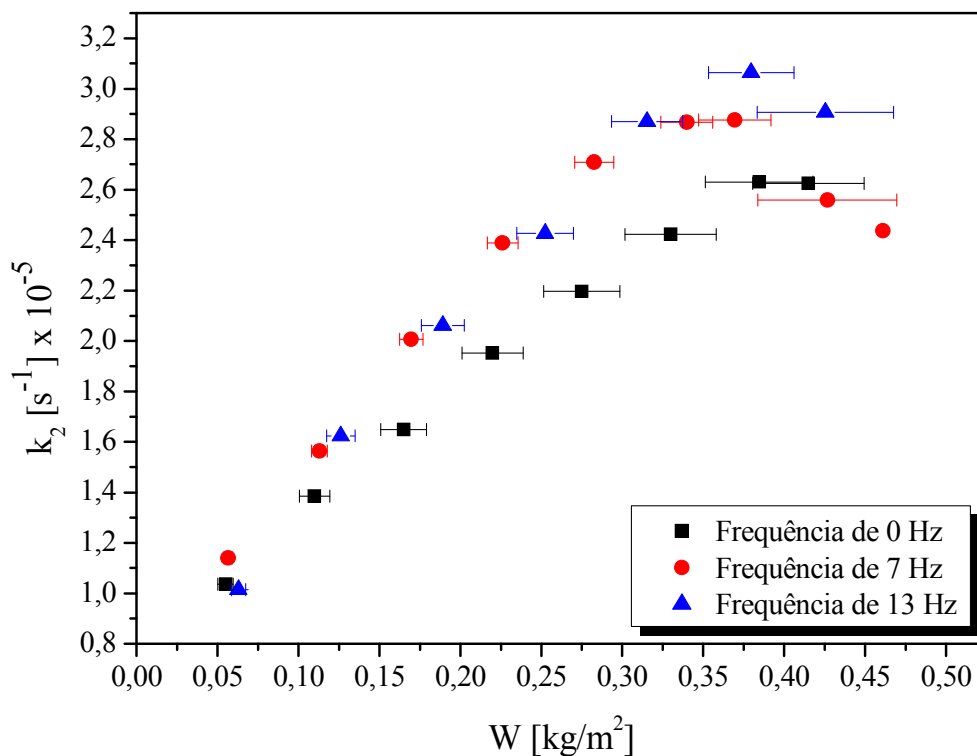


Figura 4.30 – Relação entre a resistência específica da torta e a carga mássica (f: 0, 7 e 13 Hz); rocha moída.

Nota-se na Figura 4.30 que a torta formada sob a influência da vibração mecânica era mais resistente que a torta formada no sistema funcionando na condição estática, para uma mesma carga mássica sobre o tecido de filtração. Exemplificando: a resistência específica da torta com $0,225 \text{ kg/m}^2$ de massa acumulada por unidade de área teve o valor de $1,95 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ para o sistema estático, enquanto que para o sistema submetido à vibração mecânica, esse valor é de $2,4 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, ou seja, 23,1% maior que no sistema sem vibração. Isso indicou que a vibração mecânica conduzia a um maior empacotamento das partículas no interior do meio filtrante e umas sobre as outras, o que aumentava a resistência específica da torta de filtração.

Nesse sentido, é útil avaliar-se a porosidade das tortas de filtração sob a influência das diferentes frequências de vibração, bem como a espessura das tortas formadas. A Figura 4.31 traz essas informações.

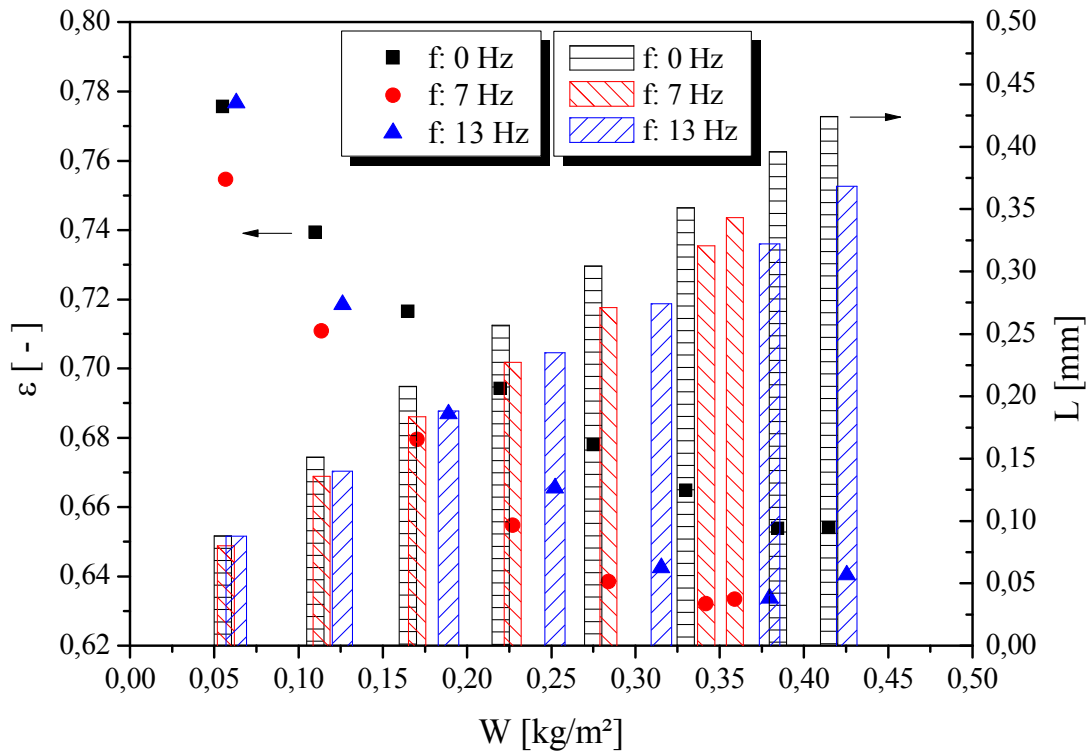


Figura 4.31 – Porosidade e espessura das tortas de filtração em relação à carga mássica de pó (f: 0, 7 e 13 Hz); rocha moída.

A Figura 4.31 mostra o decréscimo da porosidade com o aumento da massa de pó acumulada por unidade de área, e a respectiva espessura da torta de filtração em cada ponto. Nota-se que a porosidade para as tortas do sistema submetido à vibração foi menor que na torta do sistema estático. O efeito da vibração também conduziu à formação de tortas menos espessas que as tortas formadas pelo sistema estático. Para tortas compressíveis, espera-se que a menor porosidade indique, também, uma menor espessura, uma vez que as camadas superiores da torta tendem a comprimir as camadas inferiores, o que diminui a porosidade média da torta. No entanto, o comportamento observado no gráfico diferiu do esperado. Verificou-se que as tortas menos porosas foram as menos espessas e, as tortas de maior espessura foram as mais porosas. Visto que as tortas menos porosas eram as provenientes do sistema sob a influência da vibração mecânica, pôde-se inferir que houve um maior empacotamento das partículas nessas tortas, o que levou à compressão e consequente diminuição de porosidade, quando comparadas às tortas oriundas do sistema estático.

4.3.1.1 Teste Híbrido

Nesta etapa, decidiu-se averiguar como seria o comportamento do sistema no qual o processo de filtração se iniciasse com o sistema estático e, atingida determinada queda de pressão, começasse a sofrer influência da vibração mecânica. O teste foi realizado seguindo o procedimento descrito no Subitem 3.4.4 do Capítulo 3. Para a realização do teste, foi utilizado filtro de poliéster, rocha fosfática moída com vazão mássica de alimentação de 0,183 g/s, velocidade de filtração de 10 cm/s e frequência de vibração de 13 Hz. O motor excêntrico foi ligado no instante em que a queda de pressão na torta de filtração atingia o valor pré-estabelecido de 4903 Pa.

A Figura 4.32 apresenta a curva de filtração do sistema submetido ao teste misto. Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A. Pôde-se observar que o ponto de colmatação da torta formada no sistema misto foi cerca de 0,175 kg/m².

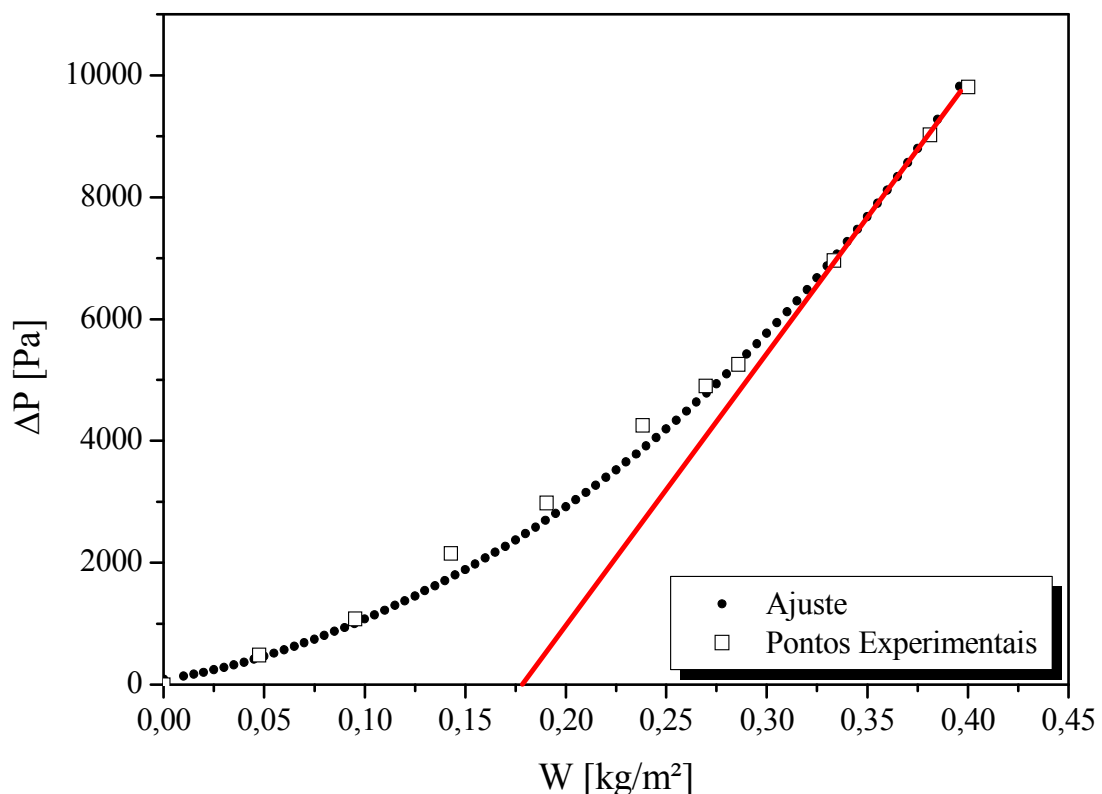


Figura 4.32 – Curva de filtração para o teste híbrido; rocha moída

A Tabela 4.2 mostra os valores do ponto de colmatação para o teste híbrido, comparando-os com o teste do sistema estático e do sistema submetido à vibração contínua de 13 Hz, conforme discutido no Subitem 4.4.1.

Tabela 4.2 – Ponto de Colmatação para o teste híbrido e para os testes independentes.

Ponto de Colmatação	Testes Independentes	Teste Híbrido
f: 0 Hz	0,050	0,175
f: 13 Hz	0,050	

Observa-se que no teste híbrido, a massa acumulada por unidade de área, necessária para o início da formação da torta de filtração, foi maior que nos testes independentes.

A Figura 4.33 apresenta as curvas de filtração do sistema híbrido e dos sistemas independentes, operando com 0 e a 13 Hz de frequência de vibração.

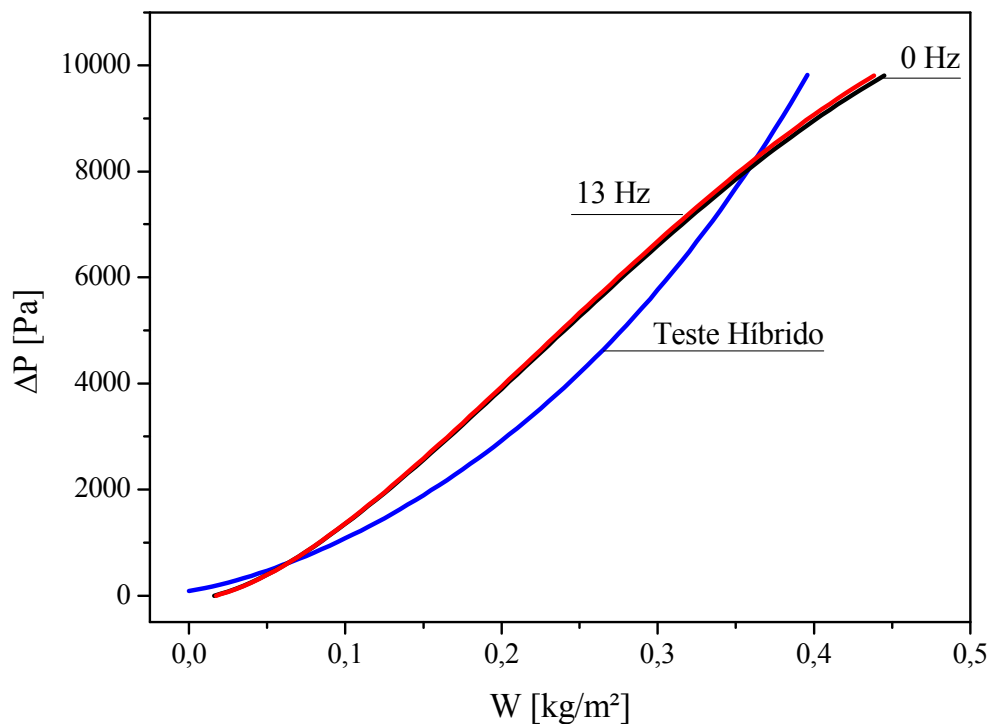


Figura 4.33 – Comparação entre o teste híbrido e os testes independentes; rocha moída.

Nota-se, na Figura 4.33, que o comportamento da curva de filtração do teste para o sistema híbrido foi claramente diferente das curvas de filtração dos sistemas independentes. Ao passo que nos sistemas independentes a curva de filtração mostrou nitidamente os três estágios da filtração, no teste híbrido ficou evidenciada a etapa de filtração interna, na qual as partículas se acomodaram entre as fibras, no interior do filtro, provocando uma lenta elevação da queda de pressão do meio, durante a maior parte do período de filtração. No entanto, a massa necessária para que o sistema híbrido alcançasse a queda de pressão pré-estabelecida de 9806 Pa foi muito próxima da massa dos sistemas independentes, sendo: 0,420 kg/m^2 para o sistema independente com frequência de 13 Hz; 0,410 kg/m^2 para o sistema estático independente e 0,400 kg/m^2 para o sistema híbrido.

4.3.2 Rocha Fosfática Virgem

Os ensaios nesta etapa foram realizados em filtro de poliéster, com velocidade de filtração de 10 cm/s, vazão mássica de alimentação de material particulado de 0,184 g/s e queda máxima de pressão de 9806 Pa. O objetivo desta etapa foi avaliar a influência da vibração mecânica sobre as tortas formadas com partículas de maior diâmetro característico. Optou-se, então, pelo uso de apenas uma frequência de vibração, a fim de se comparar o resultado obtido com o teste do sistema estático. A frequência de vibração escolhida para a realização dos testes foi de 7 Hz.

Na Figura 4.34 é apresentado o ajuste da curva de filtração para o resultado de três testes realizados com o sistema estático. Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A.

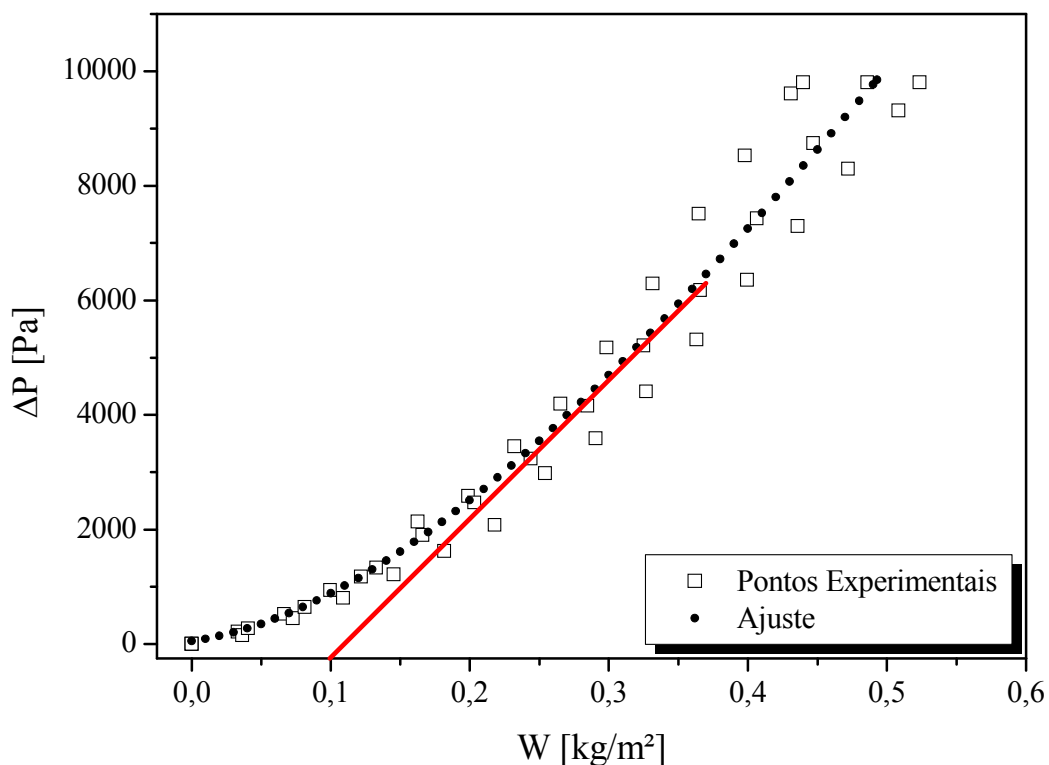


Figura 4.34 – Curva de filtração (f: 0 Hz); rocha virgem.

Verifica-se, na Figura 4.34, que a curva de filtração apresentou concavidade voltada para cima, mostrando um período de filtração de profundidade. Em seguida, foi possível observar um comportamento linear, referente à filtração de caráter superficial. A massa média total de pó acumulada por unidade de área sobre o meio filtrante, necessária para atingir a queda máxima de pressão de 9806 Pa, foi de 0,470 kg/m². Foi necessária uma carga mássica

próxima de $0,100 \text{ kg/m}^2$ para que a torta iniciasse sua formação, correspondendo a quase 120% do valor encontrado para a rocha moída, nas mesmas condições operacionais.

Na Figura 4.35 é mostrado o ajuste da curva de filtração para o resultado de três testes realizados com o sistema submetido à vibração contínua com frequência de 7 Hz. Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A.

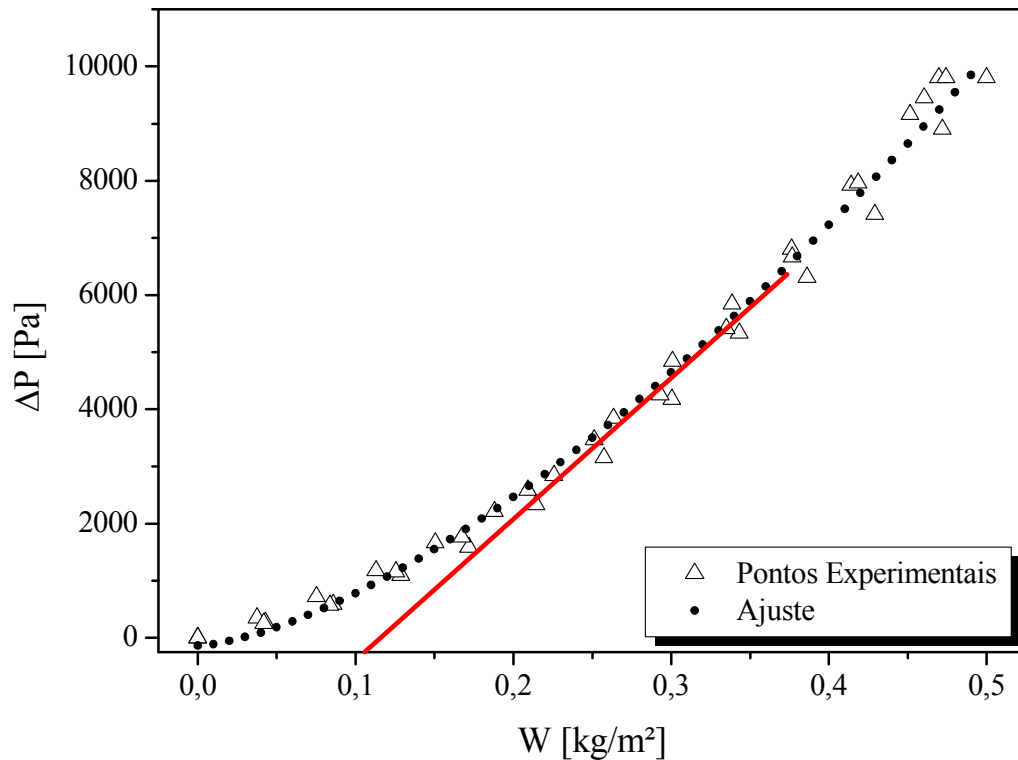


Figura 4.35 – Curva de filtração (f: 7 Hz); rocha virgem.

Pôde-se observar na Figura 4.35, que a vibração de 7 Hz no sistema filtrando rocha virgem conduziu à formação de uma curva de filtração com a concavidade da curva para cima, o que indica o período de filtração de profundidade; em seguida, nota-se o comportamento linear, o que apontou para uma filtração de caráter superficial no final do experimento. Assim como no experimento estático, foi necessária uma carga mássica média de $0,470 \text{ kg/m}^2$ para que o sistema alcançasse a queda de pressão determinada.

O ponto de colmatção, definido como a massa acumulada necessária para que se iniciasse a formação da torta de filtração, foi em torno de $0,110 \text{ kg/m}^2$, valor muito próximo ao encontrado para o teste estático de filtração de rocha virgem.

A influência da filtração no arraste do filtro é observada através da Figura 4.36, na qual se percebe que a resistência do filtro foi praticamente a mesma até a metade do período de tempo avaliado no ensaio, tanto no sistema estático quanto no sistema submetido à vibração de 7 Hz. A partir do acúmulo de 0,320 kg/m² de massa por unidade de área, o arraste do filtro para o sistema submetido à vibração começou a apresentar valores mais altos que para o sistema estático, até que no final do experimento essa diferença esteja em torno de 13,6 %. Isso sugeriu que a acomodação das partículas, quando o sistema estava sob a influência da vibração mecânica, provocou a diminuição da permeabilidade do meio (filtro + torta), o que aumentou o arraste em relação ao sistema estático.

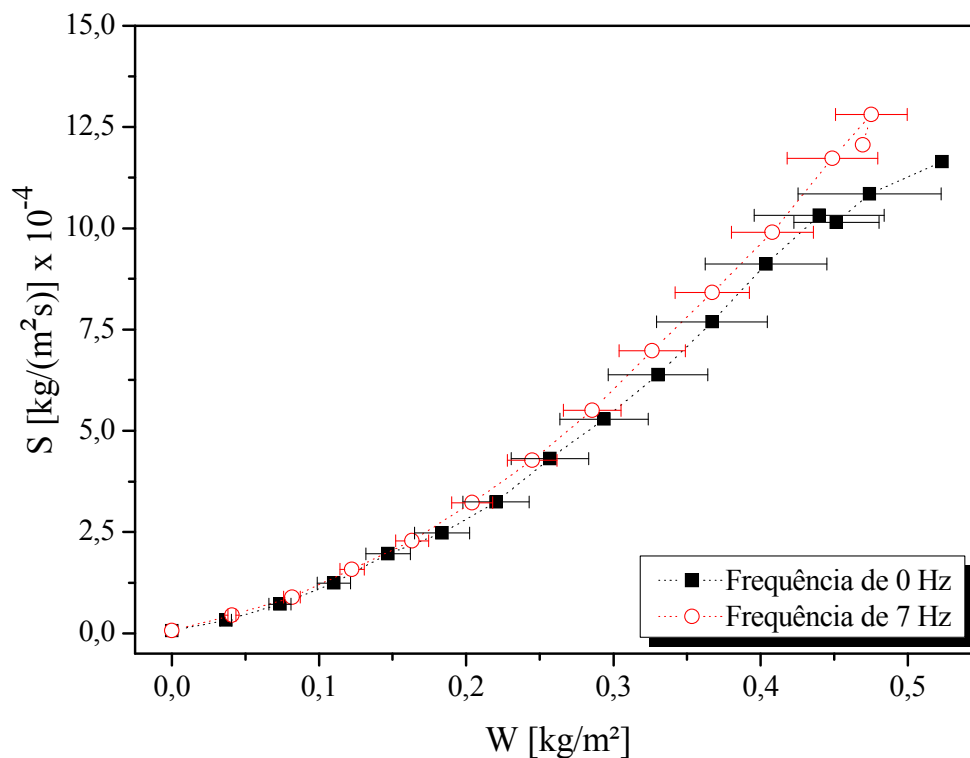


Figura 4.36 – Carga mássica por arraste (f: 0 e 7Hz); rocha virgem.

A relação entre a resistência específica média da torta de filtração (k_2) e a massa de material particulado acumulado por unidade de área sobre o meio filtrante (W), para os ensaios realizados com as frequências de vibração de 0 e 7 Hz, é apresentada na Figura 4.37.

Foi possível observar no gráfico da Figura 4.37 que a resistência específica da torta de filtração do experimento submetido à vibração era maior que para a torta formada a partir do sistema estático, para uma dada massa de pó acumulada por unidade de área. Por exemplo, para um acúmulo médio de 0,325 kg/m² de pó sobre o filtro, o valor de k_2 para o sistema

estático foi em torno de $1,9 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, enquanto que para o sistema vibrando a 7 Hz, o valor de k_2 foi de $2,1 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, ou seja, um valor 10,5 % maior.

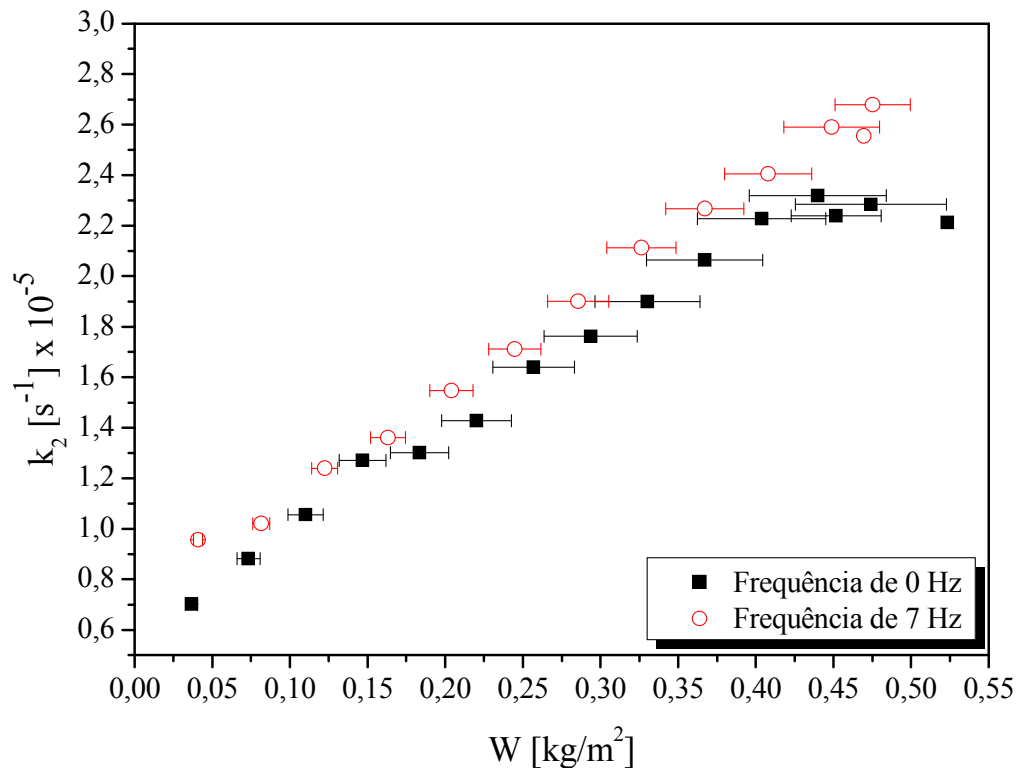


Figura 4.37 – Relação entre a resistência específica da torta e a carga mássica (f: 0 e 7 Hz); rocha virgem.

A Figura 4.38 traz informações quanto à porosidade (ϵ) e espessura (L) da torta, em relação à massa de pó acumulada por unidade de área (W), para o sistema operando a 0 Hz e a 7 Hz de frequência de vibração. Foi possível observar o decréscimo da porosidade com o aumento da massa de pó acumulada por unidade de área, e a respectiva espessura da torta de filtração em cada ponto.

Observa-se que a porosidade para a torta do sistema submetido à vibração foi menor que a porosidade da torta oriunda do sistema estático, que apresentou maior espessura que aquela. Verificou-se, então, que, semelhantemente ao que ocorreu com a filtração da rocha fosfática moída, para a rocha virgem, as tortas menos porosas foram as menos espessas e, as tortas de maior espessura foram as mais porosas.

As tortas menos porosas e menos espessas foram as provenientes do sistema sob a influência da vibração mecânica, o que sugeriu um maior empacotamento das partículas

nessas tortas, que conduziu à compressão e consequente diminuição de porosidade, quando comparadas às tortas provenientes do sistema estático.

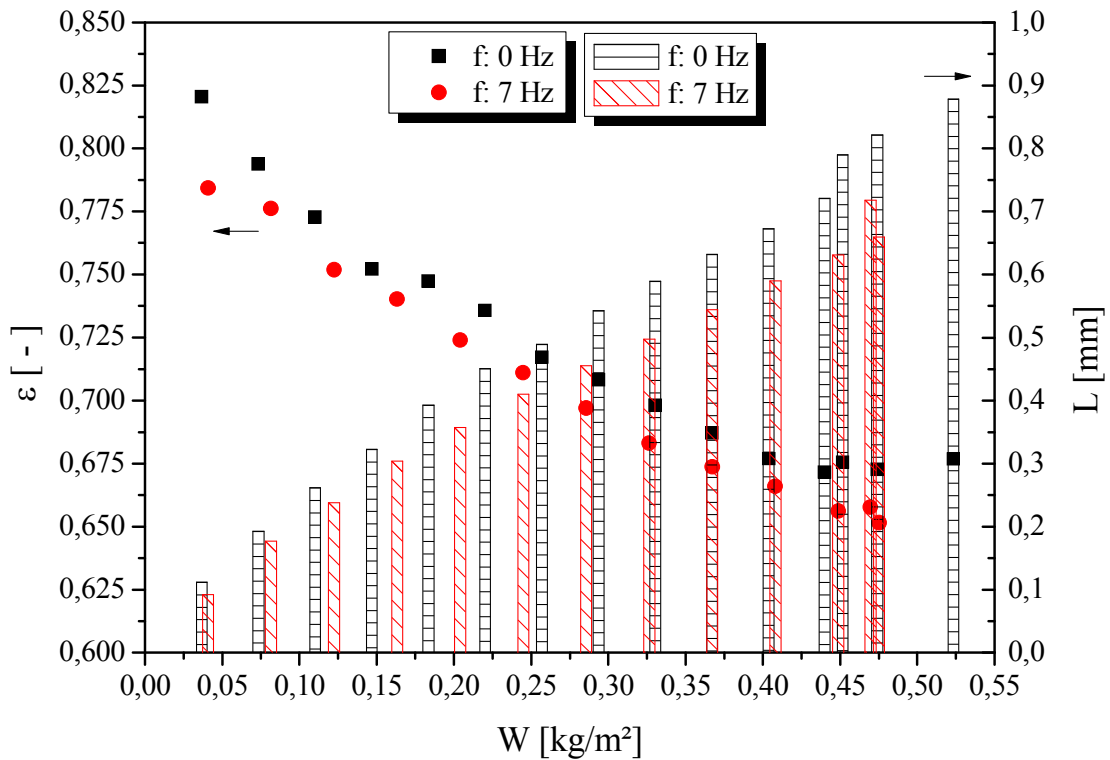


Figura 4.38 – Porosidade e espessura das tortas de filtração em relação à carga mássica de pó (f: 0 e 7 Hz); rocha virgem.

4.3.3 Polvilho Doce

Os ensaios nesta etapa foram realizados em filtro de poliéster, com velocidade de filtração de 10 cm/s, vazão mássica de alimentação de material particulado de 0,1835 g/s e queda máxima de pressão de 9806 Pa. O objetivo desta etapa foi avaliar a influência da vibração mecânica sobre as tortas formadas com partículas com diferente formato em relação à rocha fosfática. Optou-se pelo uso de apenas uma frequência de vibração, a fim de se comparar o resultado obtido com o teste do sistema estático. A frequência de vibração escolhida para a realização dos testes foi de 7 Hz.

A Figura 4.39 apresenta o ajuste da curva de filtração para o resultado de três testes realizados com o sistema estático. Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A.

Verifica-se, na Figura 4.39, que a curva de filtração apresentou concavidade voltada para cima que representa um período de filtração de profundidade. Em seguida, foi possível observar um comportamento linear que indica uma filtração de caráter superficial. A massa média total de pó acumulada por unidade de área sobre o meio filtrante, necessária para atingir a queda máxima de pressão de 100 cm de H₂O (9806 Pa), foi de 0,760 kg/m². Foi necessária uma carga mássica próxima de 0,210 kg/m² para que a torta iniciasse sua formação. O período de filtração interna para o polvilho, no sistema estático, foi maior que para a filtração de rocha fosfática nas mesmas condições.

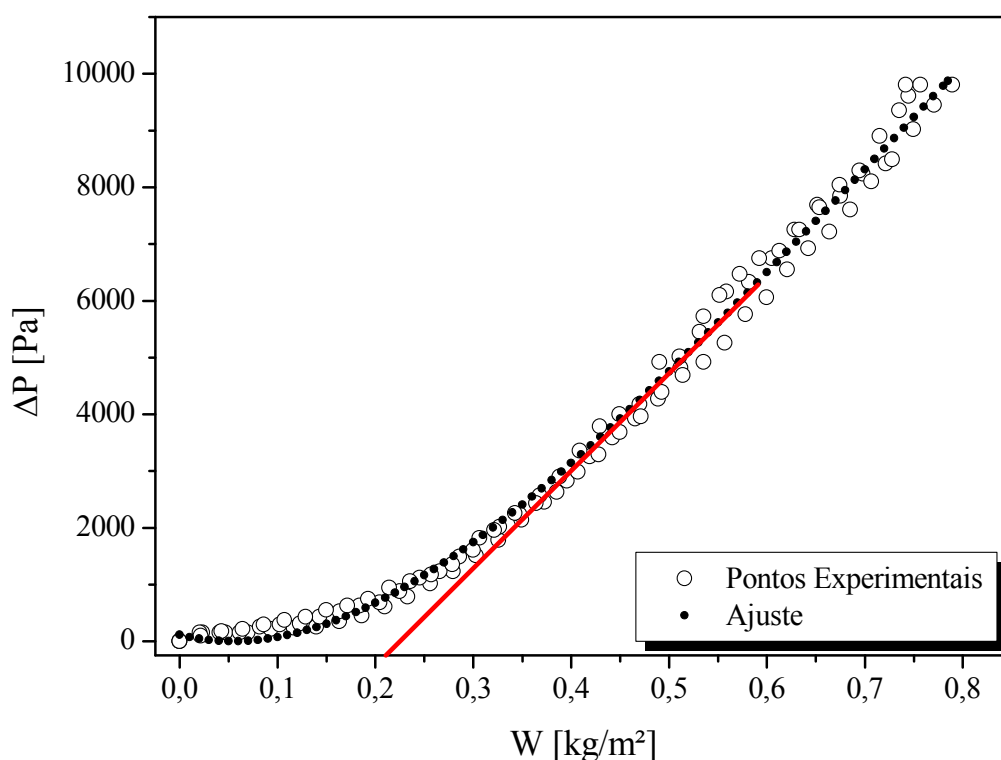


Figura 4.39 – Curva de filtração (f: 0 Hz): polvilho doce.

A Figura 4.40 mostra o ajuste da curva de filtração para o resultado de três testes realizados com o sistema submetido à vibração contínua com frequência de 7 Hz. Os parâmetros do ajuste estão expostos no Apêndice A.

Pôde-se observar na Figura 4.40, que a vibração de 7 Hz no sistema filtrando polvilho conduziu à formação de uma curva de filtração com a concavidade da curva para cima, denotando um período de filtração de profundidade; em seguida, um comportamento linear referente a uma filtração de caráter superficial no final do experimento. Foi necessária uma carga mássica de 0,870 kg/m² para que o sistema alcançasse a queda de pressão determinada. O ponto de colmatção, definido como a massa acumulada necessária para que

se inicie a formação da torta de filtração, foi em torno de $0,110 \text{ kg/m}^2$, valor abaixo ao encontrado para o teste estático de filtração de polvilho. Isso sugere que a vibração influenciou de tal forma na acomodação das partículas no interior do filtro que isso provou uma diminuição próxima de 47,6% na massa necessária para o início da formação da torta, em relação ao teste com o sistema estático.

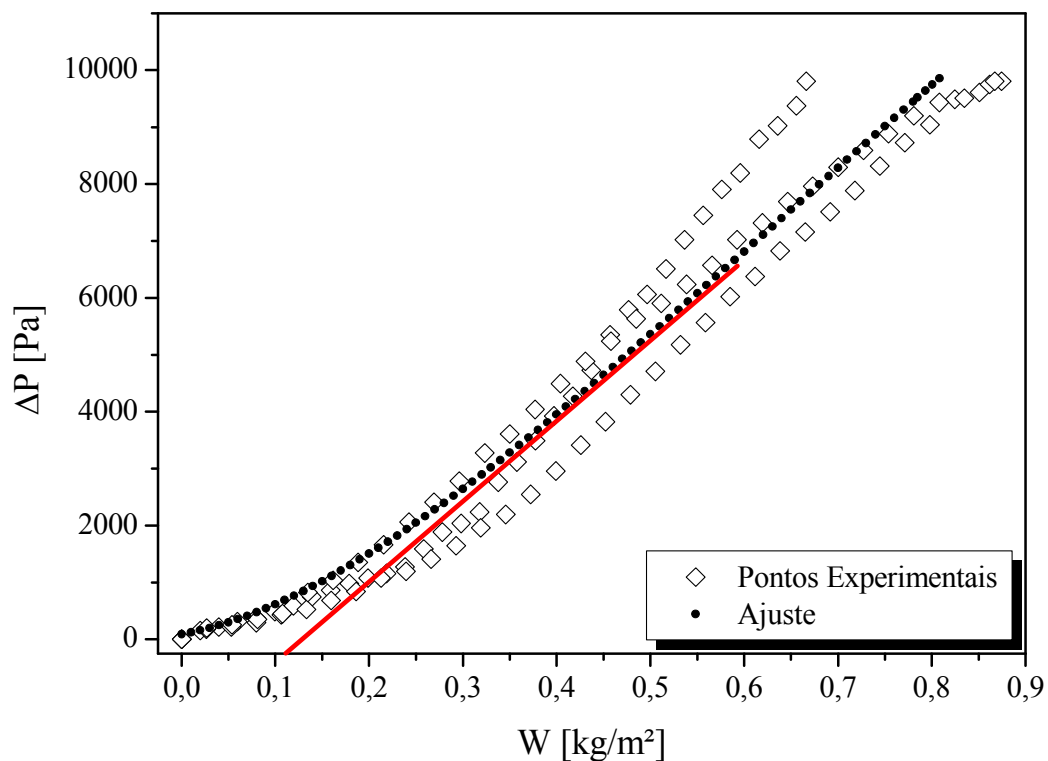


Figura 4.40 – Curva de filtração (f: 7 Hz): polvilho doce.

A influência da filtração no arraste do filtro é observada através da Figura 4.41, na qual se percebe que a resistência do filtro foi maior para o sistema submetido à vibração mecânica. O arraste do filtro para o sistema submetido à vibração apresentou valores em torno de 66% mais altos que para o sistema estático. Isso sugere que a acomodação das partículas, quando o sistema esteve sob a influência da vibração mecânica, provocou a diminuição da permeabilidade do meio (filtro + torta), o que aumenta o arraste em relação ao sistema estático.

Os valores encontrados para o arraste do filtro utilizando-se polvilho como material particulado foram bem maiores que os resultados para a rocha fosfática. Isso se deve ao formato quase esférico das partículas de polvilho, que se acomodam melhor, diminuindo os espaços de passagem de ar na torta e aumentando o arraste do filtro.

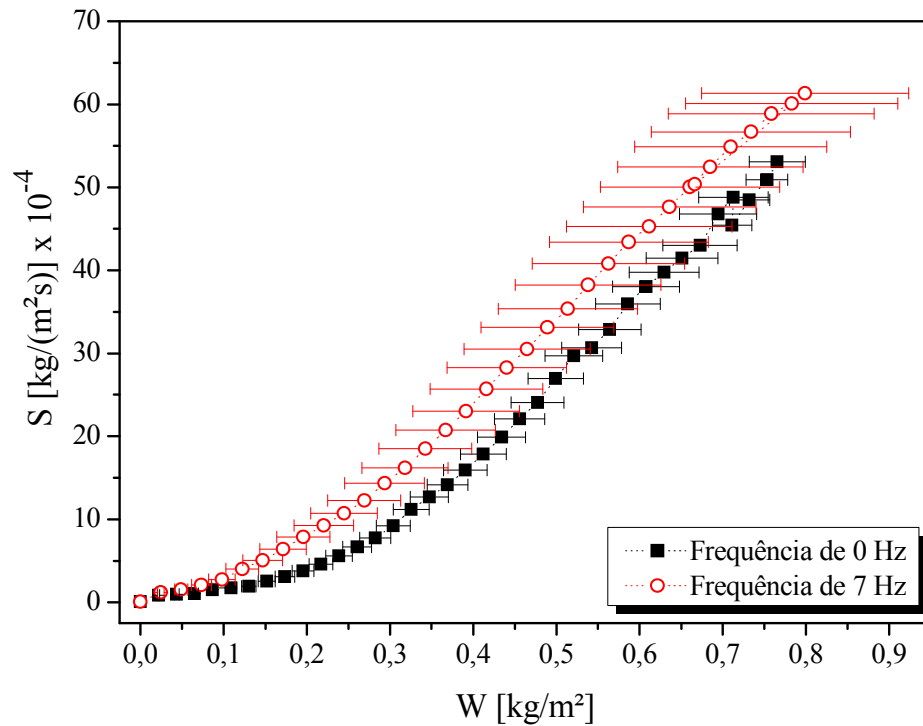


Figura 4.41 – Carga mássica por arraste (f: 0 e 7Hz); polvilho doce.

A relação entre a resistência específica média da torta de filtração (k_2) e a massa de material particulado acumulado por unidade de área sobre o meio filtrante (W), para os ensaios realizados com as frequências de vibração de 0 e 7 Hz, é apresentada na Figura 4.42.

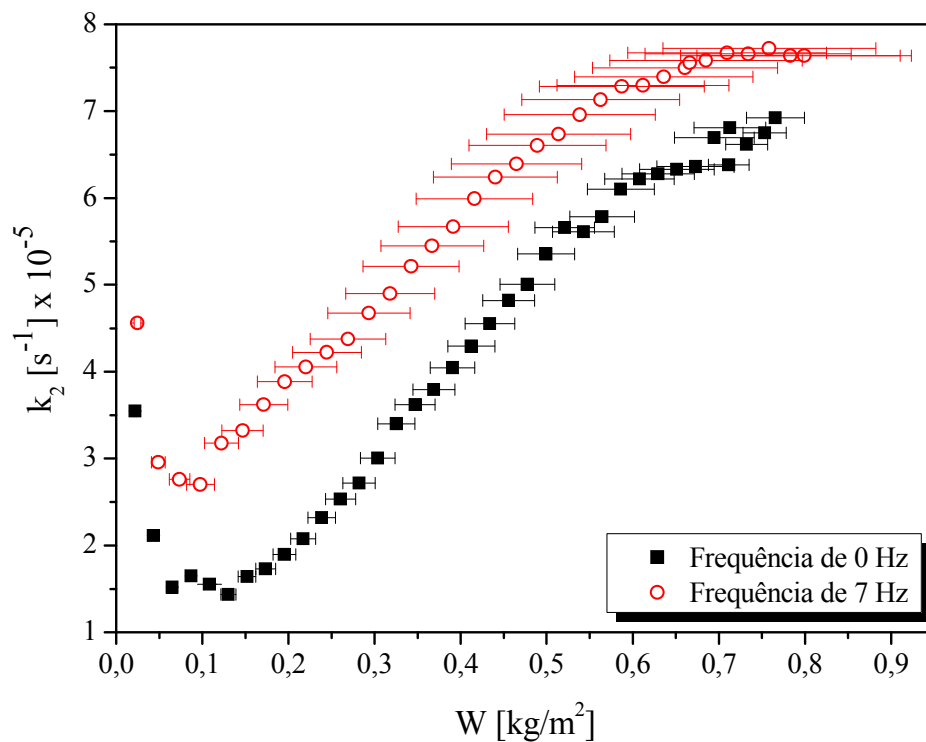


Figura 4.42 – Relação entre a resistência específica da torta e a carga mássica (f: 0 e 7 Hz); polvilho doce.

Foi possível observar no gráfico da Figura 4.42 que a resistência específica da torta de filtração do experimento submetido à vibração foi maior que para a torta formada a partir do sistema estático, para uma dada massa de pó acumulada por unidade de área. Para um acúmulo médio de $0,250 \text{ kg/m}^2$ de pó sobre o filtro, o valor de k_2 para o sistema estático foi em torno de $2,5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, enquanto que para o sistema vibrando a 7 Hz, o valor de k_2 foi de $4,3 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, ou seja, um valor 72% maior. Quando a massa acumulada esteve em torno de $0,650 \text{ kg/m}^2$, k_2 para o sistema estático foi $6,3 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, ao passo que para o sistema submetido à vibração, k_2 é $7,6 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, valor 20,63% mais alto para o sistema funcionando com vibração mecânica.

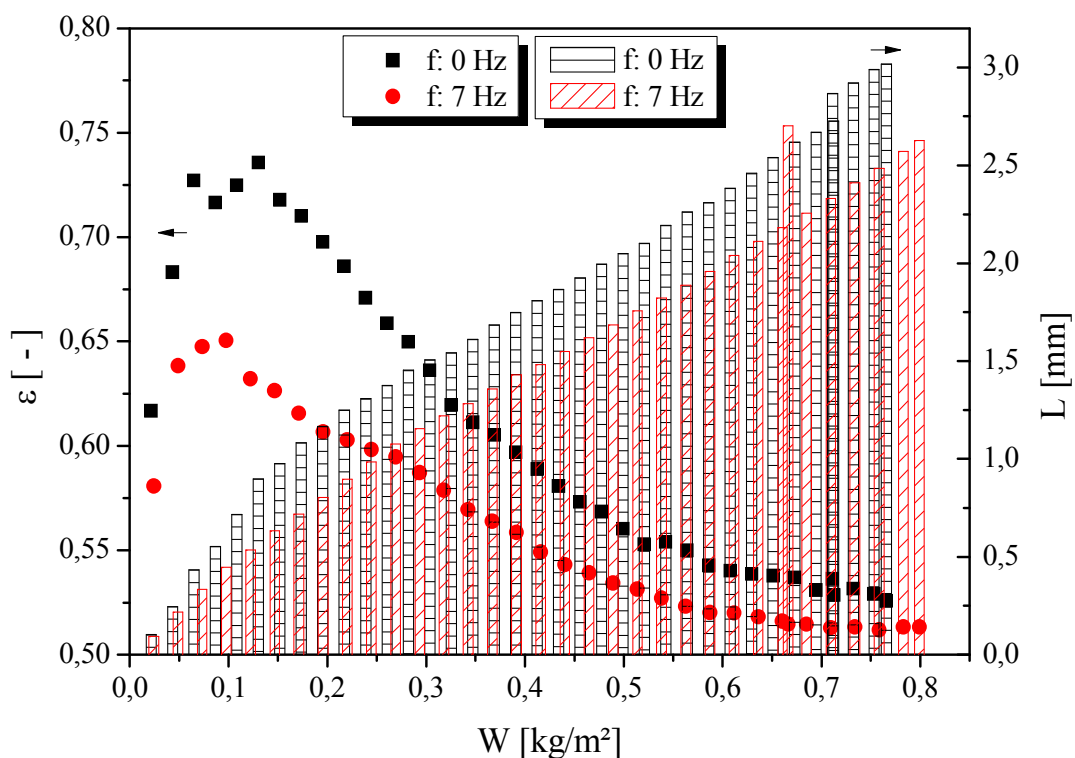


Figura 4.43 – Porosidade e espessura das tortas de filtração em relação à carga mássica de pó (f: 0 e 7 Hz); polvilho doce.

Através da Figura 4.43 pôde-se obter informações quanto à porosidade (ε) e espessura (L) da torta, em relação à massa de pó acumulada por unidade de área (W), para o sistema operando a 0 Hz e a 7 Hz de frequência de vibração. Foi possível observar o decréscimo da porosidade com o aumento da massa de pó acumulada por unidade de área, e a respectiva espessura da torta de filtração em cada ponto. Nota-se que a porosidade para a torta do sistema submetido à vibração foi menor que a porosidade da torta oriunda do sistema estático. A torta do sistema estático apresentou maior espessura que a do sistema sob

influência de vibração. Verificou-se, então, que, semelhantemente ao que ocorreu com a filtração da rocha fosfática moída, para o polvilho, as tortas menos porosas foram as menos espessas e, as tortas de maior espessura foram as mais porosas. As tortas menos porosas e menos espessas foram as provenientes do sistema sob a influência da vibração mecânica, o que sugere um maior empacotamento das partículas nessas tortas, que conduz à compressão e consequente diminuição de porosidade, quando comparadas às tortas provenientes do sistema estático.

Ainda na Figura 4.43 é possível observar um aumento da porosidade nos instantes iniciais da operação de filtração, tanto no sistema operando sem vibrar quanto no sistema submetido à vibração mecânica. É interessante notar que as porosidades das tortas, calculadas pela correlação de Ergun (Equação 2.4) começam a apresentar um comportamento decrescente depois do ponto de colmatação, o que indica que a correlação utilizada tem validade apenas a partir da formação da torta de filtração.

O ajuste log-normal representou bem a distribuição granulométrica do polvilho utilizado no experimento. Sendo esta uma das condições para o uso da Equação de Endo (Equação 2.5), realizou-se o cálculo da porosidade das tortas de filtração formadas pelo polvilho, com e sem o efeito da vibração mecânica, com o intuito de avaliar se os parâmetros da Equação (2.5) eram mais sensíveis à vibração provocada pelo motor excêntrico.

A Figura 4.44 apresenta o gráfico comparativo entre a porosidade calculada por meio da correlação de Ergun e da correlação de Endo, das tortas formadas com frequências de vibração de 0 Hz e de 7 Hz.

Verifica-se na Figura 4.44 que a porosidade calculada pela Equação de Endo se aproximou dos valores calculados pela Equação de Ergun, mantendo, inclusive, a mesma diferença entre os valores calculados para o sistema estático em relação ao sistema com vibração.

Na Figura 4.44, vislumbra-se um comportamento diferente do observado para a rocha fosfática: a porosidade aumentou nos instantes iniciais do teste, para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático, quando, então, começou a decrescer. Esse comportamento também foi observado nos gráficos das Figuras 4.42 e 4.43, que mostraram, respectivamente, a resistência específica da torta de filtração e a porosidade, ambas as variáveis em relação à massa de pó depositada por unidade de área. Uma possível explicação para esse fato foi que,

para os testes com polvilho verificou-se que uma parte do material atravessou o filtro de poliéster, tanto para o sistema estático como para o sistema vibrando. Isso também foi verificado por Rodrigues (2006), em cujo experimento foi observado que houve penetração total do polvilho através do tecido. A profundidade de deposição das partículas de polvilho, provavelmente por causa do formato quase esférico do polvilho, foi maior que a profundidade de deposição da rocha fosfática, em conformidade com Tanabe (2008).

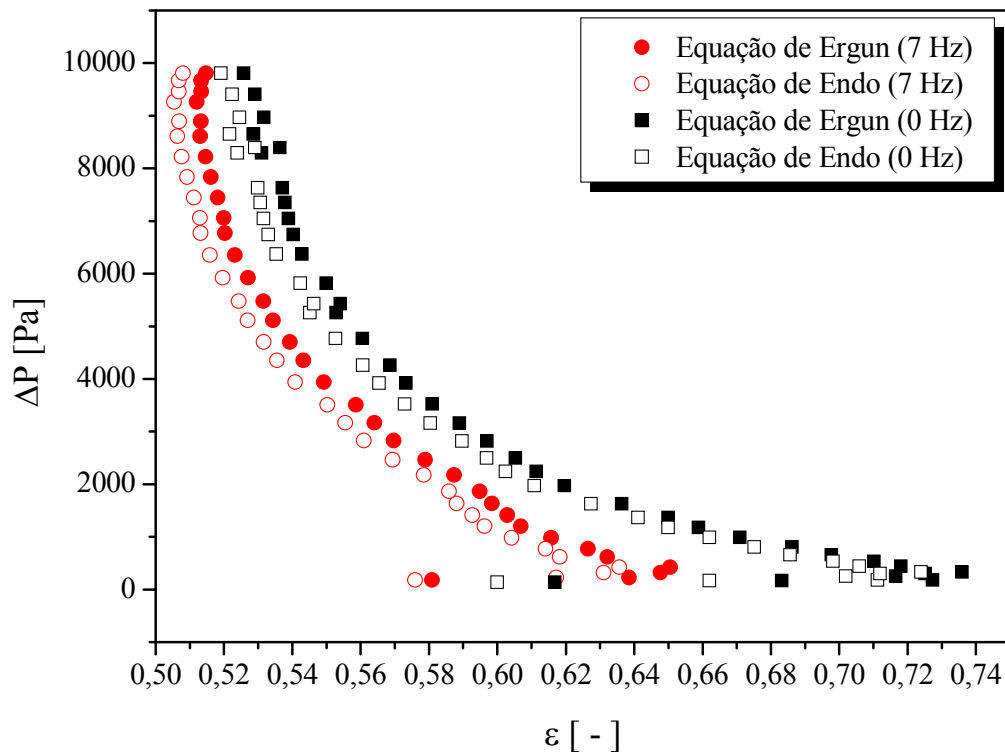


Figura 4.44 – Comparação entre a porosidade das tortas calculadas pela Eq. de Ergun e pela Eq. de Endo (f: 0 e 7 Hz); polvilho doce.

Outra provável explicação para o comportamento da Figura 4.44 seria o surgimento de lacunas durante a deposição das partículas, umas sobre as outras, o que reduziria a resistência específica da torta, aumentando a porosidade (AZEVEDO, 2009). A descrição “deposição de partículas, umas sobre as outras”, concorda com a definição dada para “dendritos”, que são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante, e passam a agir como novos elementos coletores (REMBOR; KASPER, 1996). No entanto, foi observado por Rodrigues (2006) que as partículas de polvilho parecem não formar esses dendritos, apresentando-se bem distribuídas no interior do meio filtrante.

4.3.4 Comparação entre Rocha Moída, Rocha Virgem e Polvilho Doce

Os gráficos das Figuras 4.45 a 4.47, juntamente com a Tabela 4.3, apresentam a comparação dos resultados dos testes para a rocha moída (RM), rocha virgem (RV) e polvilho doce, com o sistema estático e com o sistema operando sob influência de vibração mecânica à frequência de 7 Hz.

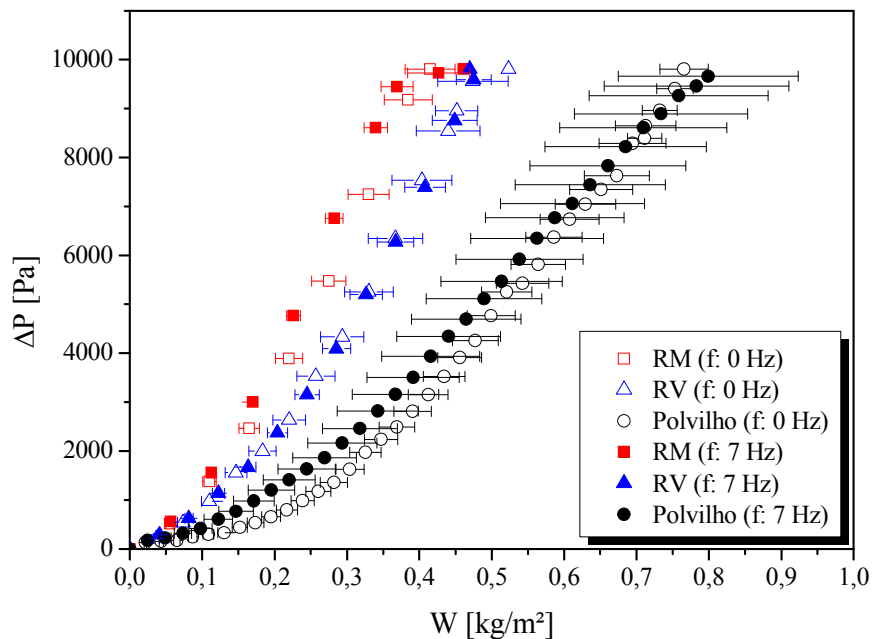


Figura 4.45 – Comparação entre as curvas de filtração para rocha moída, rocha virgem e polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).

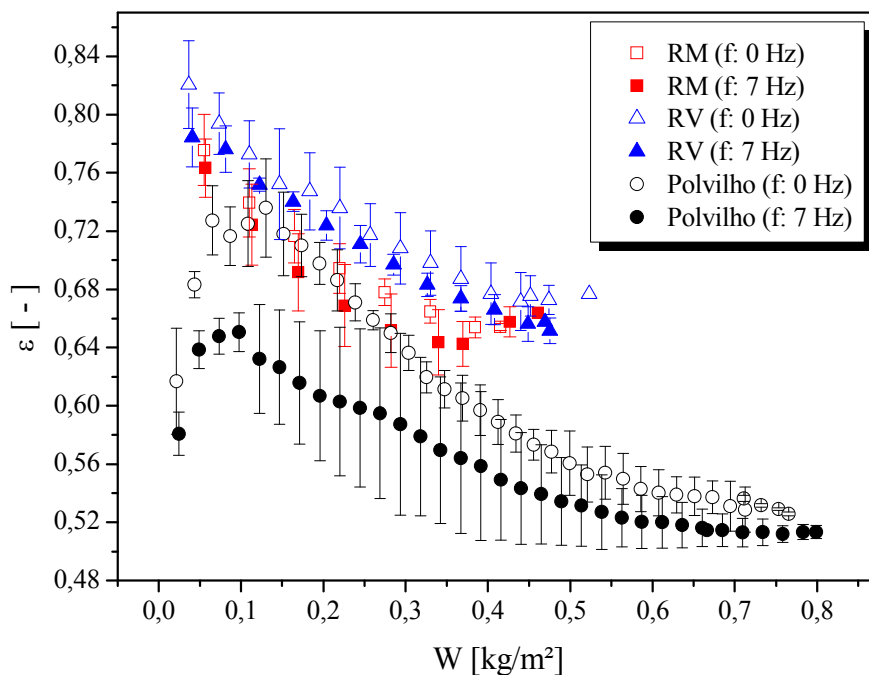


Figura 4.46 – Comparação das porosidades das tortas para rocha moída, rocha virgem e polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).

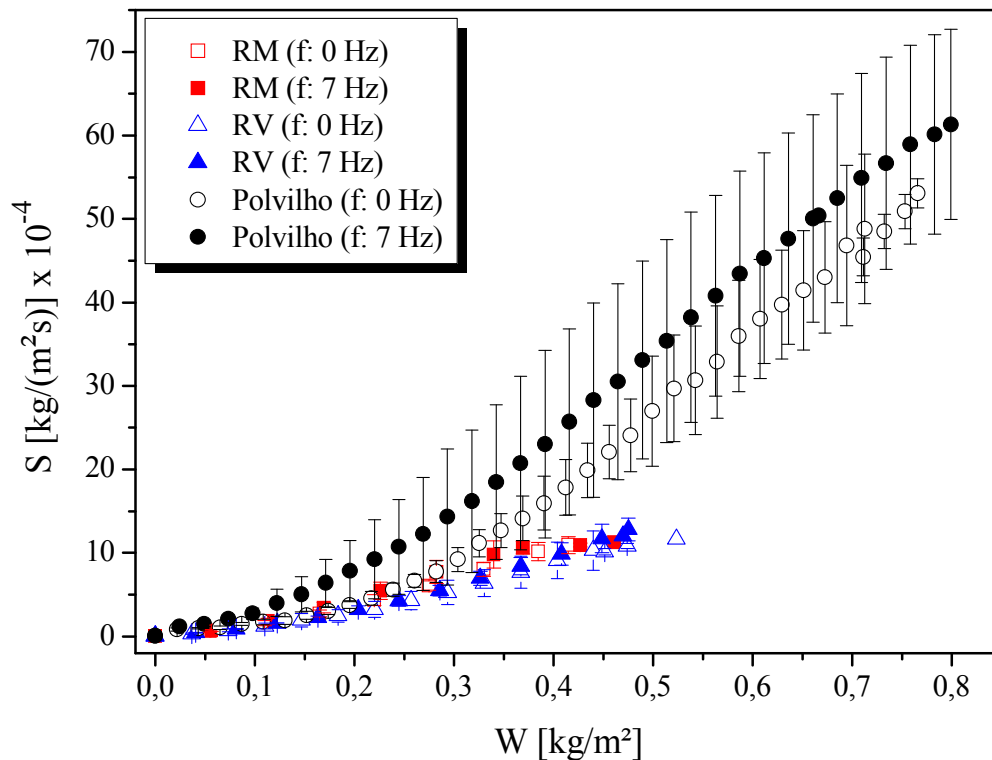


Figura 4.47 – Comparação do arraste do filtro (S) para a filtração da rocha moída, da rocha virgem e do polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).

Tabela 4.3 – Ponto de colmatação para as tortas dos diferentes materiais, nas frequências de 0 Hz e 7 Hz.

Ponto de Colmatação	Rocha Moída	Rocha Virgem	Polvilho Doce
f: 0 Hz	0,05	0,10	0,21
f: 7 Hz	0,03	0,11	0,11

A. Comparação entre a Rocha Moída e a Rocha Virgem

Analisando-se a Figura 4.45 e os dados da Tabela 4.3, observou-se que a rocha virgem, para uma mesma carga mássica que a rocha moída, apresentou menor queda de pressão. O ponto de colmatação para a rocha virgem foi consideravelmente maior que para a rocha moída, para ambas as frequências avaliadas, o que sugere um maior período de filtração interna para a rocha virgem. Além disso, a massa acumulada por unidade de área para que a torta atingisse a máxima curva de pressão determinada, foi maior que a massa da rocha moída. Considerando-se que a única diferença entre os testes realizados estava na distribuição

granulométrica, que para a rocha virgem, é composta por partículas maiores, pôde-se inferir que a diferença de diâmetro alterou o comportamento da filtração.

Esses resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Rembor e Kasper (1996), Aguiar e Coury (1996) e Rodrigues (2006), que explicam que as partículas maiores recobrem a superfície das fibras com menos eficiência que as partículas menores, o que resulta numa menor queda de pressão na torta. Isso influencia no arraste do filtro. Para a filtração da rocha virgem, conforme a Figura 4.47, o arraste foi menor do que para a filtração da rocha moída em todos os pontos experimentais.

Jeon e Jung (2004) também concluíram que, para aerossóis monodispersos, as partículas menores tendem a causar uma maior queda de pressão através da torta, quando comparados a outros aerossóis monodispersos na mesma extensão de deposição em densidade de partículas, em área e em massa. No caso do presente estudo, as partículas foram polidispersas. No entanto, o comportamento descrito por Jeon e Jung (2004) também pode ser observado para as partículas menores (rocha moída) em relação às partículas maiores (rocha virgem).

Observa-se, no entanto, que o comportamento discutido nos parágrafos anteriores se conserva quando se analisa o processo de filtração submetido à vibração mecânica. A diferença de diâmetros foi determinante na estruturação da torta de filtração. Para a filtração da rocha moída, percebeu-se que a vibração mecânica também exerceu influência sobre a estrutura da torta, levando à formação de uma torta significativamente menos porosa, com maior resistência específica e queda de pressão que a torta proveniente do sistema estático, de acordo com a Figura 4.46 e conforme foi discutido no Subitem 4.3.1 deste capítulo.

No entanto, constata-se que a filtração da rocha virgem apresentou diferenças pouco significativas entre o sistema vibrando e o sistema estático. O aspecto mais evidente da diferença entre os testes com rocha virgem foi o acréscimo de 13,6% no valor do arraste para o sistema submetido à vibração, relação ao sistema estático, nos estágios finais do experimento, segundo o que foi apresentado no Subitem 4.3.2 deste capítulo. Isso sugere que a vibração exerceu pouca influência sobre partículas maiores e de formato irregular, levando a formação de tortas com praticamente a mesma estrutura para ambos os sistemas testados (0 e 7 Hz).

B. Comparação entre a Rocha Fosfática e o Polvilho Doce

Uma análise das Figuras 4.45 a 4.47 e da Tabela 4.3 permitiu observar que, considerando-se as mesmas condições operacionais, houve grande diferença dos resultados obtidos para o polvilho doce, em relação à rocha fosfática. Pôde-se notar que houve maior acúmulo de massa nos experimentos com polvilho, que também apresentaram o maior arraste de filtro e formaram tortas menos porosas que as tortas de rocha fosfática. O formato quase esférico das partículas de polvilho permitiu uma melhor acomodação destas no conjunto torta-tecido (TANABE, 2008), de maneira a provocar menor queda de pressão por massa acumulada, em relação à rocha fosfática, conforme se vê na Figura 4.45.

Pôde-se observar, na Figura 4.45, que o polvilho apresentou maior período de filtração de profundidade (filtração interna), caracterizado pelo ponto de colmatação, conforme a Tabela 4.3. Isso indica que, ao contrário do que se imaginava, não houve entupimento dos poros, mas, sim, uma distribuição mais homogênea das partículas no interior do tecido. Essa distribuição homogênea seria responsável por propiciar menores perdas de carga e maior eficiência de coleta (TANABE, 2008). Esse resultado confirmou a importância da característica do material na determinação do comportamento da curva de filtração.

A porosidade das tortas de polvilho foi menor que nas tortas de rocha fosfática, conforme a Figura 4.46. Uma vez que o diâmetro médio das partículas de polvilho foi maior que das partículas de rocha fosfática, esse resultado era esperado, pois, de acordo com Aguiar e Coury (1996) a porosidade da torta aumenta consideravelmente com o decréscimo do diâmetro da partícula. Além disso, segundo Endo (2001), partículas irregulares, que é o caso da rocha fosfática, formam tortas com maiores valores de porosidade, quando comparadas com as tortas formadas por partículas esféricas. Endo (2001) fez essa observação para partículas monodispersas. Da mesma forma, os resultados do presente estudo também levam a concluir o mesmo para partículas polidispersas.

Destaca-se claramente, na Figura 4.46, o efeito da vibração mecânica nos experimentos com polvilho. Pôde-se observar que a torta formada nessas condições apresentou valores de porosidade notadamente mais baixos que para o sistema estático.

No gráfico de arraste da Figura 4.47, verificou-se que até o acúmulo de aproximadamente 0,250 kg/m² de material particulado sobre o meio filtrante, o arraste para a rocha fosfática (moída e virgem) nas duas frequências avaliadas (0 e 7 Hz) e para o polvilho

no sistema estático tiveram praticamente o mesmo comportamento. No entanto, o comportamento da curva de massa acumulada por arraste, para a filtração do polvilho no sistema com 7 Hz de frequência de vibração foi notavelmente diferente.

Constata-se que desde o início do experimento, o arraste foi maior para a filtração do polvilho a 7 Hz; e essa diferença foi aumentando e se manteve até o fim do experimento. Pôde-se inferir que por causa do formato das partículas de polvilho (quase esféricas) ou por sua densidade bem menor que a da rocha fosfática, o efeito da vibração exerceu maior influencia na estruturação da torta de filtração.

4.4 Força de Adesão

Nesta etapa foi avaliada a influência da frequência de vibração na limpeza da torta de filtração por fluxo de ar reverso. Os ensaios foram realizados com velocidade de filtração de 10 cm/s e queda máxima de pressão na torta de 9806 Pa. Foram realizados testes estáticos e testes submetidos à vibração mecânica para a filtração da rocha fosfática moída, rocha fosfática virgem e polvilho doce. A metodologia utilizada para a filtração do material pulverulento está descrita no Capítulo 3, bem como o procedimento de limpeza utilizado. Foram avaliadas três velocidades de limpeza da torta por fluxo de ar reverso:

- 1º velocidade de limpeza: 7,0 cm/s;
- 2º velocidade de limpeza: 11,0 cm/s;
- 3º velocidade de limpeza: 15,5 cm/s.

A avaliação da influência da vibração mecânica na limpeza da torta de filtração foi realizada através da metodologia de Seville *et al.* (1989) para o cálculo da força de adesão atuante na torta de filtração, conforme exposto na Seção 2.5.1 do Capítulo 2.

4.4.1 Força de Adesão na Rocha Moída

A vazão mássica de alimentação da rocha moída foi de 0,183 g/s. A rocha moída foi filtrada no sistema submetido às vibrações de 0, 7 e 13 Hz.

A Figura 4.48 mostra a fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c).

A partir da Figura 4.48, foi possível observar que entre a primeira e a segunda limpeza houve maior desprendimento de massa na torta do sistema estático, seguida pelo

sistema vibrando a 13 Hz. Novamente, a mesma tendência foi observada entre a segunda e a terceira limpeza, mostrando uma melhor eficiência do processo de limpeza para o sistema estático, em relação ao sistema submetido à vibração mecânica.

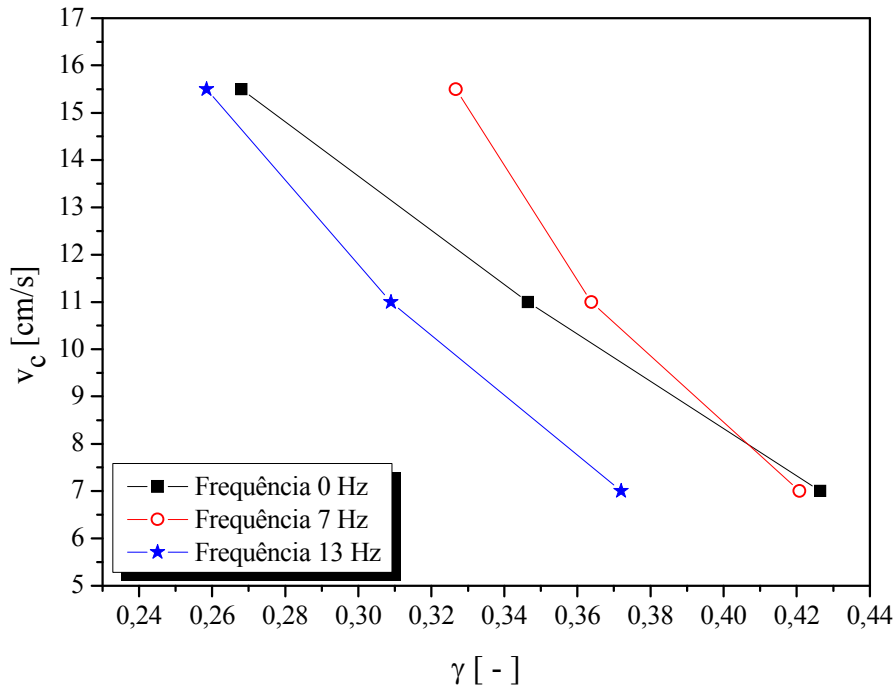


Figura 4.48 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); rocha moída.

Ao final da limpeza, nota-se que houve uma diminuição de 37% na massa retida sobre o filtro proveniente do sistema estático, 30,5% no filtro do sistema vibrando com frequência de 13 Hz e 22% no sistema com 7 Hz de vibração. Pode-se inferir que a vibração do sistema conduziu a um empacotamento mais denso das partículas de rocha moída no interior do filtro, diminuindo a eficiência do processo de limpeza.

A fração de massa retida (γ) pela queda de pressão de limpeza (ΔP_L) é apresentada na Figura 4.49. Observa-se que a queda de pressão na torta logo após a primeira limpeza apresentou o mesmo valor para os sistemas submetidos à vibração mecânica de 7 Hz e 13 Hz, apesar de que a massa retida no sistema vibrando a 7 Hz é 13,5% maior que a massa retida, após a primeira limpeza, no sistema vibrando a 13 Hz. Após a limpeza com velocidade do fluxo de ar reverso de 15 cm/s, observou-se que a queda de pressão final na torta proveniente do sistema vibrando a 13 Hz se aproximou do valor encontrado para a torta do sistema estático. A maior queda de pressão após a última limpeza foi observada para o sistema sob vibração de 7 Hz, certamente por causa da maior fração de massa retida. É importante destacar que, após a primeira limpeza, a torta do sistema estático apresentou maior queda de

pressão que as tortas do sistema sob vibração; após a segunda limpeza, a queda de pressão para os três sistemas se iguala; ao final da limpeza, o sistema estático apresentou a menor queda de pressão no filtro, certamente devida à menor fração de massa retida.

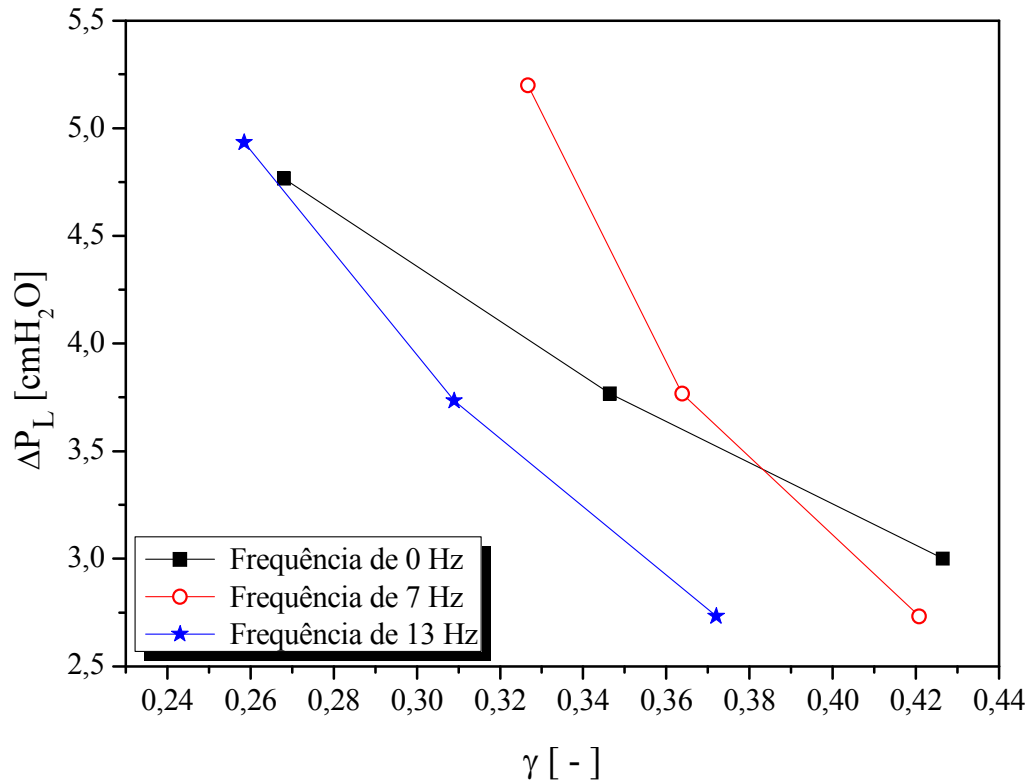


Figura 4.49 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha moída.

A Figura 4.50 apresenta o gráfico de velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L). Seguindo a metodologia de Seville *et al.* (1989), foi realizada uma regressão linear dos pontos obtidos por interpolação a partir dos gráficos anteriores (Figuras 4.48 e 4.49). O coeficiente linear das retas corresponde à tensão de remoção da torta (σ). O coeficiente angular equivale à resistência específica do filtro (k_f). A força de adesão (F_c) foi obtida pelo uso da Equação (2.39).

A Tabela 4.4 apresenta os valores encontrados para os testes com a rocha moída, através da qual foi possível constatar que a força de adesão para o sistema submetido à vibração mecânica era menor que para o sistema estático. A menor força de adesão obtida foi para o sistema com vibração de 7 Hz, que apresentou o maior valor de resistência específica do filtro.

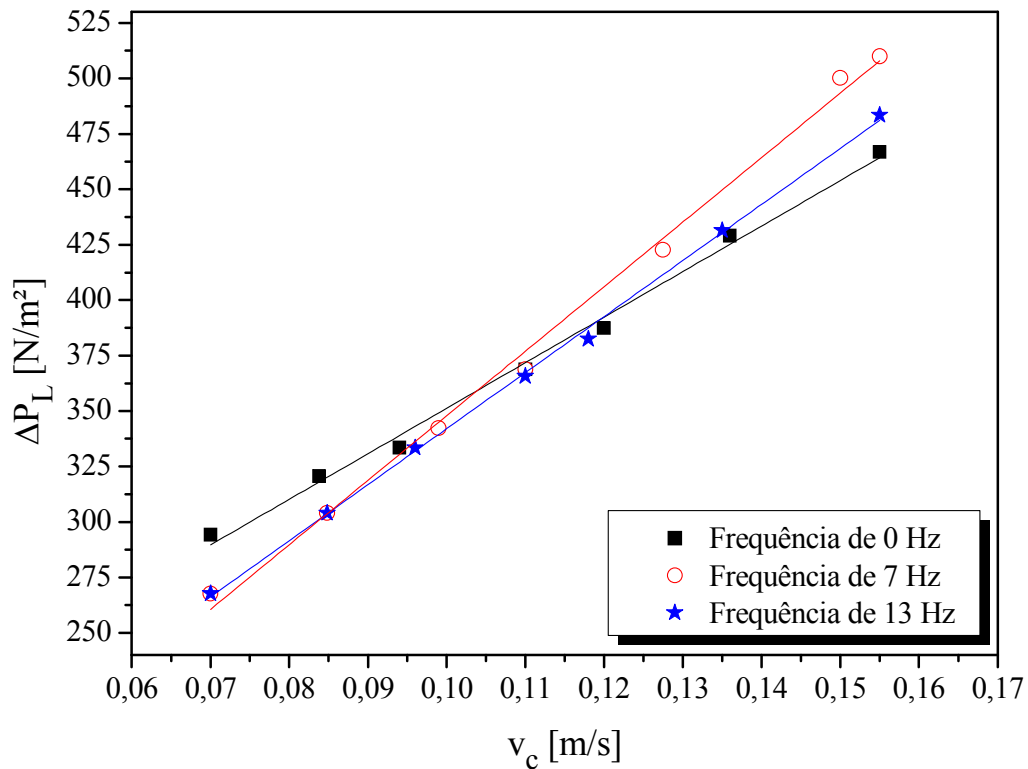


Figura 4.50 – Velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha moída.

Tabela 4.4 – Força de adesão para os testes com rocha moída.

Frequência [Hz]	r^2	k_I [N.s/m ³]	σ_R [N/m ²]	F_c [N]
0	0,994	2054,08	145,85	2,23
7	0,995	2910,62	56,80	0,87
13	0,998	2527,82	89,27	1,36

Ainda que os testes indiquem que a vibração mecânica tenha exercido uma influência na acomodação das partículas, aumentando o empacotamento do sistema, conforme foi discutido nas seções anteriores, para a rocha fosfática moída, os ensaios realizados com vibração levaram à formação de tortas com menores forças de adesão.

Uma análise minuciosa dos valores apresentados na Tabela 4.4 permitiu verificar que a força de adesão na torta do sistema estático foi o somatório das forças de adesão atuantes nas tortas formadas sob vibração mecânica de 7 e 13 Hz. No sistema com 13 Hz de frequência

de vibração, a força de adesão na torta foi um valor cerca de 39% menor que no sistema estático. Para o sistema vibrando a 7 Hz, essa diferença foi por volta de 61%. Em relação à resistência específica do filtro (k_f), o valor encontrado no experimento com vibração de 13 Hz é 23% maior que o valor do sistema estático. Para o sistema submetido a 7 Hz de vibração, a resistência específica do filtro adotou um valor por volta de 42% maior que o valor de k_f do filtro no sistema estático.

Em suma, a análise dos valores da Tabela 4.4 e das Figuras 4.48 a 4.50 levaram às seguintes considerações, quando se comparam os resultados dos sistemas submetidos à vibração com o teste estático:

- frequência de 7 Hz – apesar de desfavorecer o desprendimento da torta nas velocidades de limpeza estudadas, o que leva a maiores quedas de pressão em relação aos outros testes, foi a frequência que proporcionou os menores valores de força de adesão na torta de filtração e o maior valor para a resistência do filtro;
- frequência de 13 Hz – ao final do processo de limpeza, leva o sistema a um comportamento semelhante ao do sistema estático no que concerne à queda de pressão na torta e fração de massa retida; no entanto, conduz a valores intermediários de força de adesão e resistência específica da torta, quando comparados ao sistema estático e sob vibração de 7 Hz.

4.4.2 Força de Adesão na Rocha Virgem

Os testes com a rocha virgem foram conduzidos com vazão mássica de alimentação de 0,184 g/s, no sistema submetido às vibrações de 0 Hz e de 7 Hz. O objetivo dessa etapa foi avaliar a influência da vibração na remoção da torta de filtração.

A Figura 4.51 mostra a fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c).

Verifica-se, na Figura 4.51, que o comportamento dos dois sistemas durante a limpeza da torta de filtração foi semelhante, pois a fração de massa retida após cada limpeza teve a mesma variação para ambas as frequências de vibração: $\Delta\gamma$ é igual a 0,040 entre a primeira e a segunda limpeza e, $\Delta\gamma$ é de aproximadamente 0,012 entre a segunda e a terceira limpeza, para ambas as frequências de vibração. Ao final da limpeza, houve uma diferença em torno de 0,050 para a fração de massa retida entre a primeira e a última limpeza, indicando a eficiência de limpeza do sistema submetido à vibração é semelhante à do sistema estático.

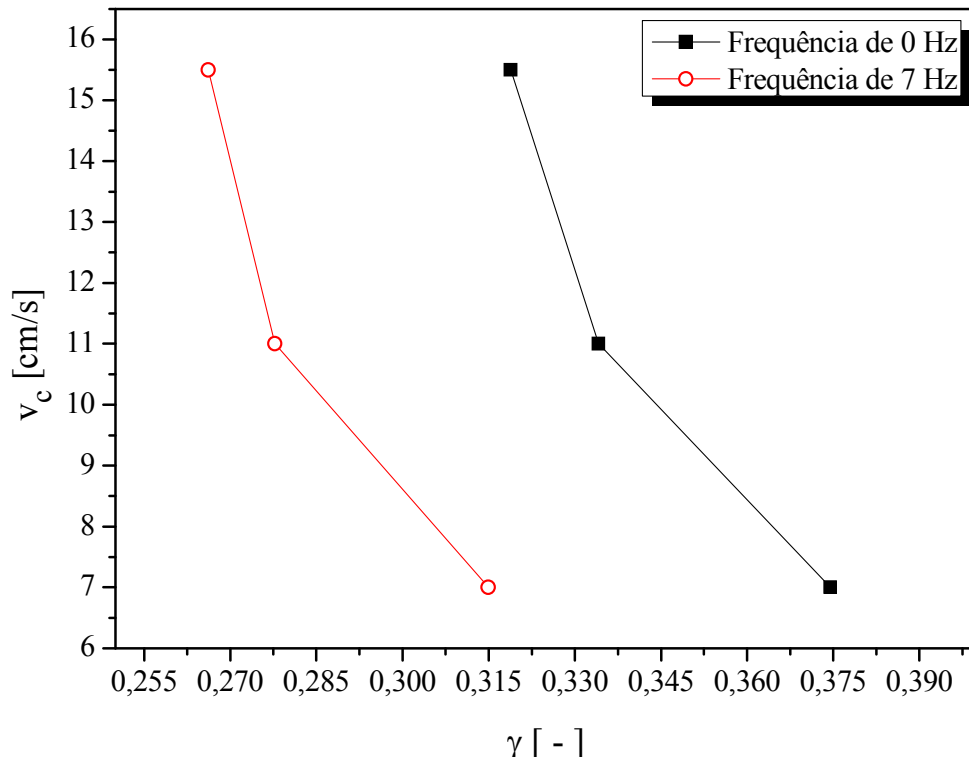


Figura 4.51 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); rocha virgem.

A fração de massa retida (γ) pela queda de pressão de limpeza (ΔP_L) é apresentada na Figura 4.52.

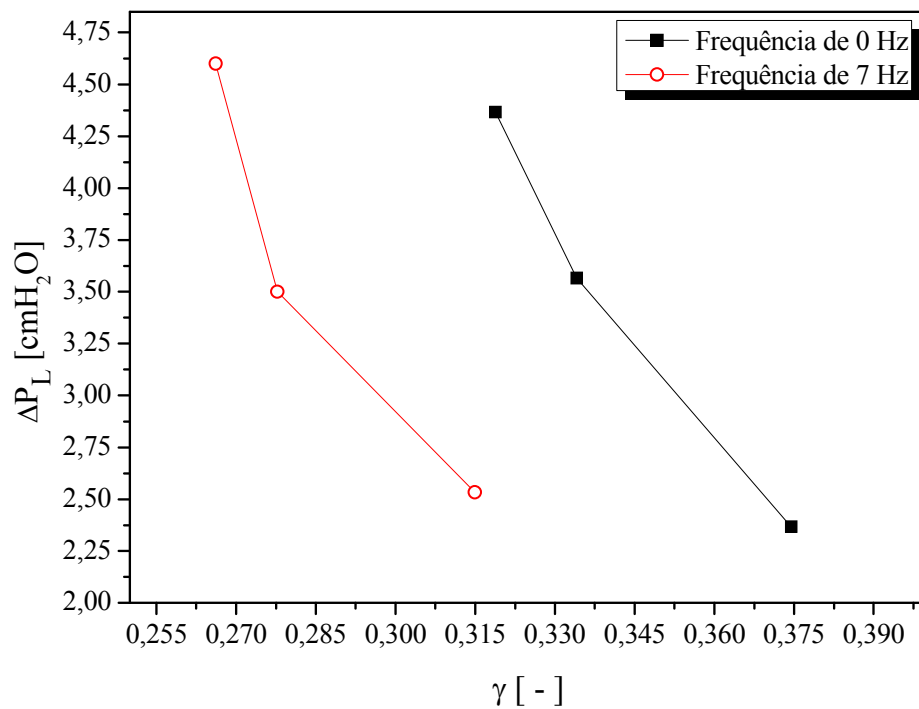


Figura 4.52 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha virgem.

Observa-se, na Figura 4.52, que a queda de pressão na torta logo após a primeira limpeza apresentou maior valor para o sistema submetido à vibração mecânica de 7 Hz. A maior queda de pressão após a última limpeza foi observada para o sistema sob vibração de 7 Hz, ainda que a massa retida sobre o filtro seja menor que no sistema estático. A torta do sistema estático apresentou menor queda de pressão que as tortas do sistema sob vibração após a primeira limpeza; o valor da queda de pressão se igualou na segunda limpeza, para ambos os testes; ao final da limpeza, o sistema estático apresentou a menor queda de pressão no filtro, apesar de contar com maior fração de massa retida.

A Figura 4.53 apresenta o gráfico de velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L). Seguindo a metodologia de Seville *et al.* (1989), foi realizada uma regressão linear dos pontos obtidos por interpolação a partir dos gráficos anteriores (Figuras 4.51 e 4.52). O coeficiente linear das retas corresponde à tensão de remoção da torta (σ). O coeficiente angular equivale à resistência específica do filtro (k_l). A força de adesão (F_c) foi obtida pelo uso da Equação (2.39).

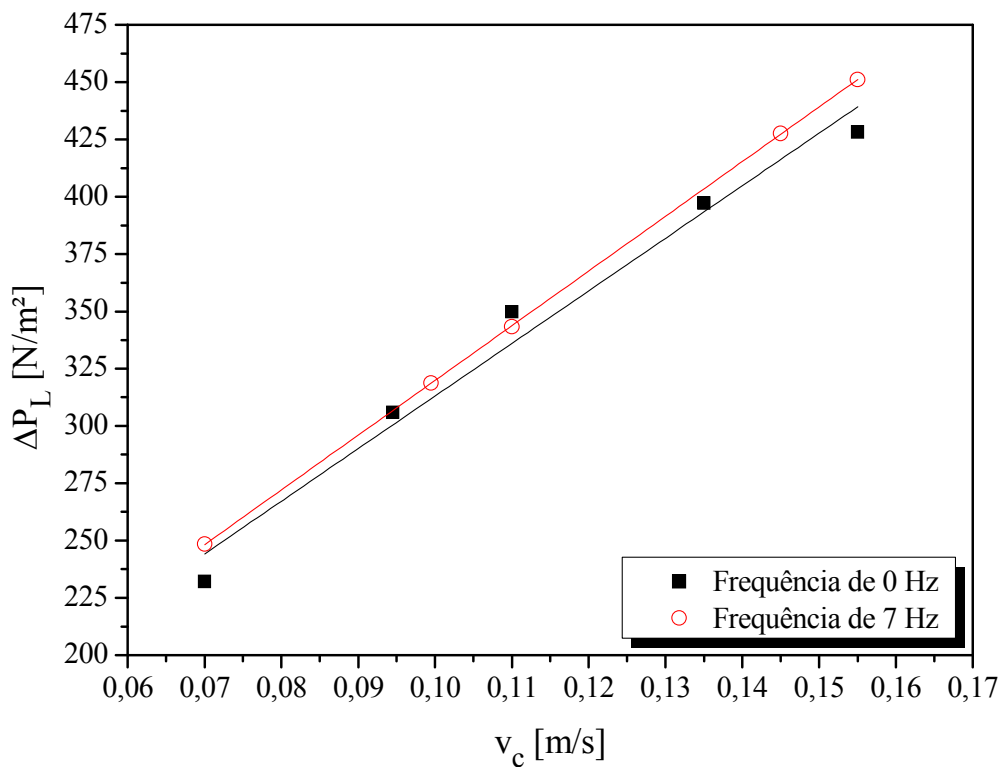


Figura 4.53 – Velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); rocha virgem.

A Tabela 4.5 apresenta os valores encontrados para os testes com a rocha virgem.

Tabela 4.5 – Força de adesão para os testes com rocha virgem.

Frequência [Hz]	r^2	k_I [N.s/m ³]	σ_R [N/m ²]	F_c [N]
0	0,972	2294,1	83,6	1,28
7	0,999	2387,1	81,1	1,24

Na Tabela 4.5 verifica-se que a força de adesão para o sistema submetido à vibração mecânica teve um valor muito próximo à força de adesão do sistema estático. Observa-se, no entanto, que para ambos os testes, a força de adesão apresentou um valor intermediário aos valores obtidos nas mesmas condições, para a rocha moída. Isso indicou que o aumento do diâmetro da partícula provocou aumento na força de adesão para o sistema submetido à vibração mecânica, ao passo que diminuiu a força de adesão para o sistema estático.

Analisando-se a Figura 4.53 e a Tabela 4.5 pôde-se constatar que o coeficiente angular do ensaio a 7 Hz foi discretamente maior que o do ensaio estático, mostrando que o valor de resistência específica do filtro submetido à vibração foi pouco maior que para o sistema estático, conforme se vê na Tabela 4.5. Houve uma nítida semelhança entre o comportamento dos dois sistemas, o que possibilita a ponderar sobre a igualdade entre os resultados obtidos no sistema vibrando a 7 Hz e no sistema estático, para a rocha virgem.

4.4.3 Força de Adesão no Polvilho Doce

Os testes com o polvilho doce foram conduzidos com vazão mássica de alimentação de 0,1835 g/s, no sistema submetido às vibrações de 0 Hz e de 7 Hz. O objetivo dessa etapa foi avaliar a influência da vibração na remoção da torta de filtração.

A Figura 4.54 mostra a fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c).

Verifica-se, na Figura 4.54, que o sistema estático respondeu melhor à limpeza entre o primeiro e o segundo estágio ($v_L = 7$ cm/s e $v_L = 11$ cm/s), desprendendo mais massa que o sistema submetido à vibração de 7 Hz: a fração de massa retida no filtro do sistema estático diminuiu em 0,045, ao passo que no sistema vibrando, esse decréscimo foi de 0,017. Entre a segunda e a terceira limpeza, o decréscimo na fração de massa retida para o sistema estático foi de 0,013, contra 0,006 para o sistema submetido à vibração. Ao final da limpeza, houve uma diferença em torno de 0,060 para a fração de massa retida entre a primeira e a última

limpeza, no sistema estático, ao passo que, no sistema sob vibração de 7 Hz esse decréscimo total no valor da fração de massa retida foi de 0,020. Isso sugere maior eficiência de limpeza do sistema estático, em relação ao sistema submetido à vibração mecânica, o que pode indicar que a vibração mecânica conduza as partículas de polvilho a um empacotamento mais denso das partículas no interior do filtro.

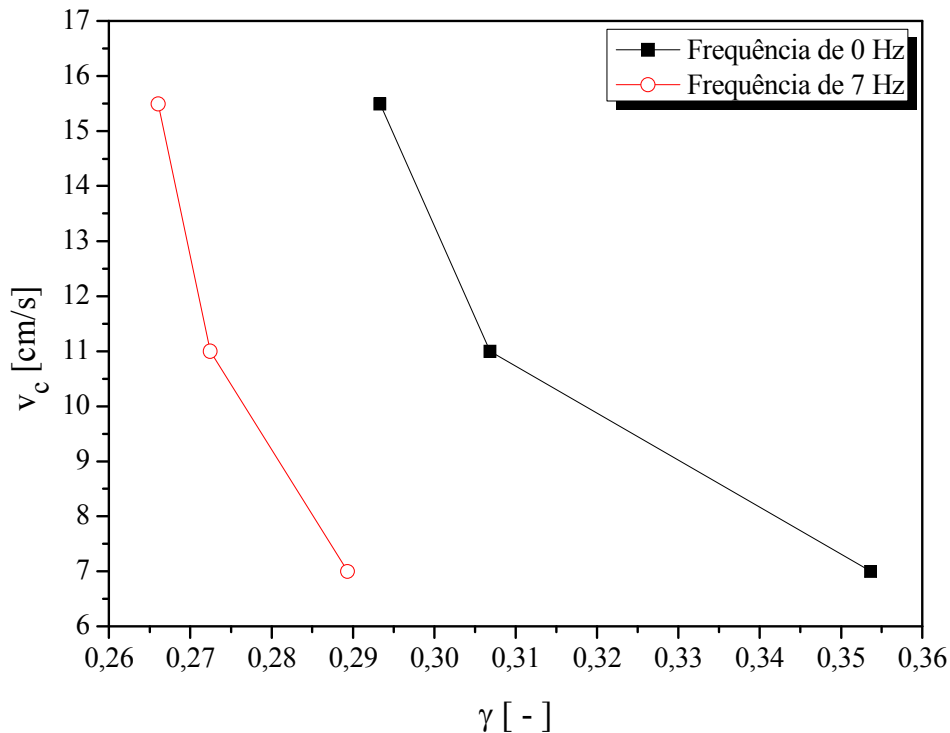


Figura 4.54 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); polvilho doce.

A fração de massa retida (γ) pela queda de pressão de limpeza (ΔP_L) é apresentada na Figura 4.55. Observa-se que a queda de pressão na torta logo após a primeira limpeza apresentou maior valor para o sistema submetido à vibração mecânica de 7 Hz. A maior queda de pressão após a última limpeza foi observada para o sistema sob vibração de 7 Hz, ainda que a massa retida sobre o filtro seja menor que no sistema estático. A torta do sistema estático apresentou menor queda de pressão que a torta do sistema sob vibração após as três limpezas; ao final da limpeza, o sistema estático apresentou a menor queda de pressão no filtro, apesar de contar com maior fração de massa retida. Isso sugere que a vibração mecânica atuante na filtração de polvilho certamente interfira na acomodação das partículas no interior do filtro, de maneira que uma menor massa acumulada resulte em maior queda de pressão.

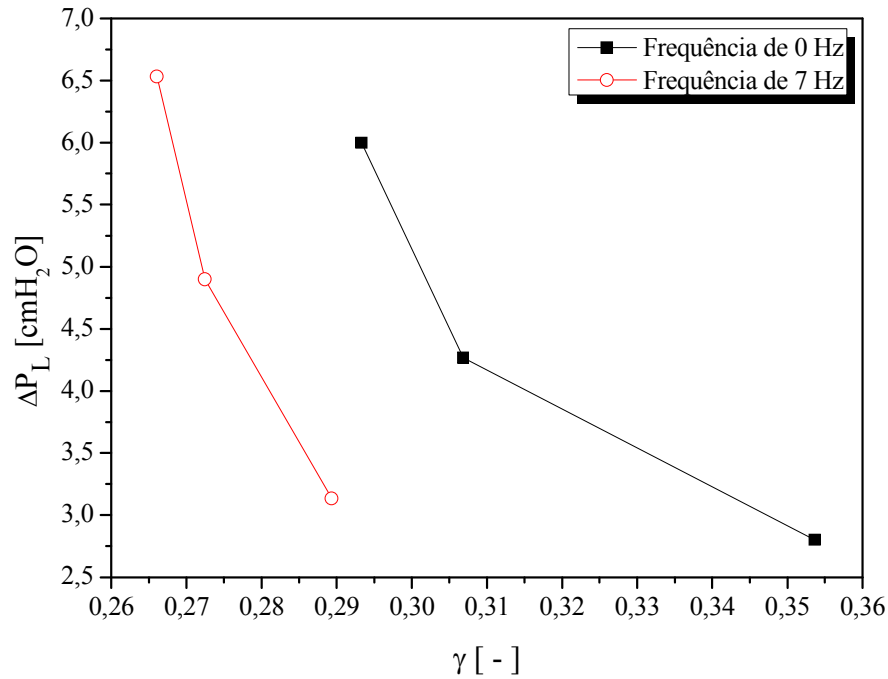


Figura 4.55 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); polvilho doce.

A Figura 4.56 apresenta o gráfico de velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L). Seguindo a metodologia de Seville *et al.* (1989), foi realizada uma regressão linear dos pontos obtidos por interpolação a partir dos gráficos anteriores (Figuras 4.54 e 4.55).

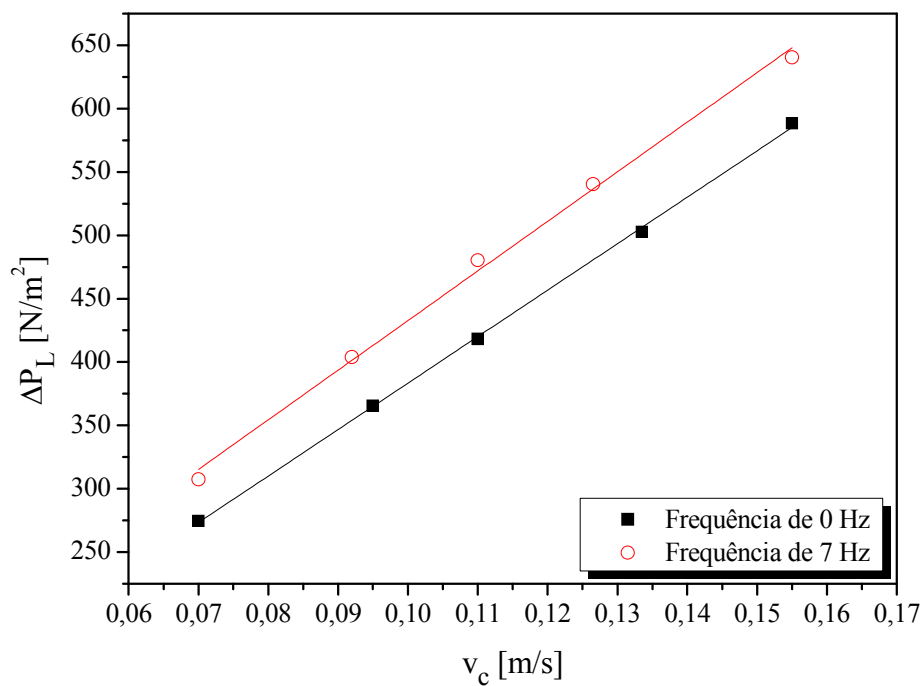


Figura 4.56 – Velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); polvilho doce.

Na Figura 4.56, o coeficiente linear das retas corresponde à tensão de remoção da torta (σ). O coeficiente angular equivale à resistência específica do filtro (k_I). A força de adesão (F_c) foi obtida pelo uso da Equação (2.39).

A Tabela 4.6 apresenta os valores encontrados para os testes com o polvilho doce.

Tabela 4.6 – Força de adesão para os testes com polvilho doce.

Frequência [Hz]	r^2	k_I [N.s/m ³]	σ_R [N/m ²]	F_c [N]
0	0,999	3668,0	16,6	0,25
7	0,997	3915,5	41,2	0,63

Na Tabela 4.6 verifica-se que a força de adesão na torta formada no sistema submetido à vibração mecânica teve maior valor que a força de adesão do sistema estático. A resistência específica do filtro também foi maior no sistema submetido à vibração. Diferente do ocorrido na filtração com a rocha fosfática, o sistema de filtração de polvilho com vibração mecânica favoreceu a formação de torta com maior força de adesão que o sistema sem vibração.

4.4.4 Comparação entre a Rocha Fosfática e o Polvilho Doce

Os valores das Tabelas 4.4 a 4.6 foram obtidos através do uso da metodologia proposta por Seville *et al.* (1989). Ao se comparar os resultados das mencionadas tabelas, percebe-se que os menores valores de força de adesão foram obtidos nos ensaios com polvilho. As partículas de polvilho são maiores que as da rocha fosfática utilizadas nos ensaios, o que conduz à formação de tortas menos compactas, facilitando a limpeza. A explicação para isso pode ser o formato quase esférico das partículas, que formam aglomerados menos resistentes, facilitando a limpeza do meio filtrante. Nota-se também que a resistência específica do filtro apresentou maiores valores para a filtração do polvilho.

4.4.5 Testes com Aterramento

Nessa etapa foram realizados dois testes de filtração de rocha fosfática moída, em filtro de poliéster, com um sistema de aterramento no filtro. O objetivo desta etapa foi averiguar se a existência de forças eletrostáticas estaria influenciando no cálculo da força de adesão. De acordo com Duarte Filho (1995), *apud* Tognetti (2007), a eficiência de filtração aumenta nos sistemas sob influência de forças eletrostáticas, devido à formação de tortas

menos compactas. Foram realizados dois ensaios para testar essa hipótese, um com frequência de vibração de 7 Hz e outro com 13 Hz. Os resultados foram comparados com os obtidos na Seção 4.4.1 deste capítulo. A descrição da metodologia utilizada encontra-se no Subitem 3.4.5 do Capítulo 3.

A Figura 4.57 mostra a fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c).

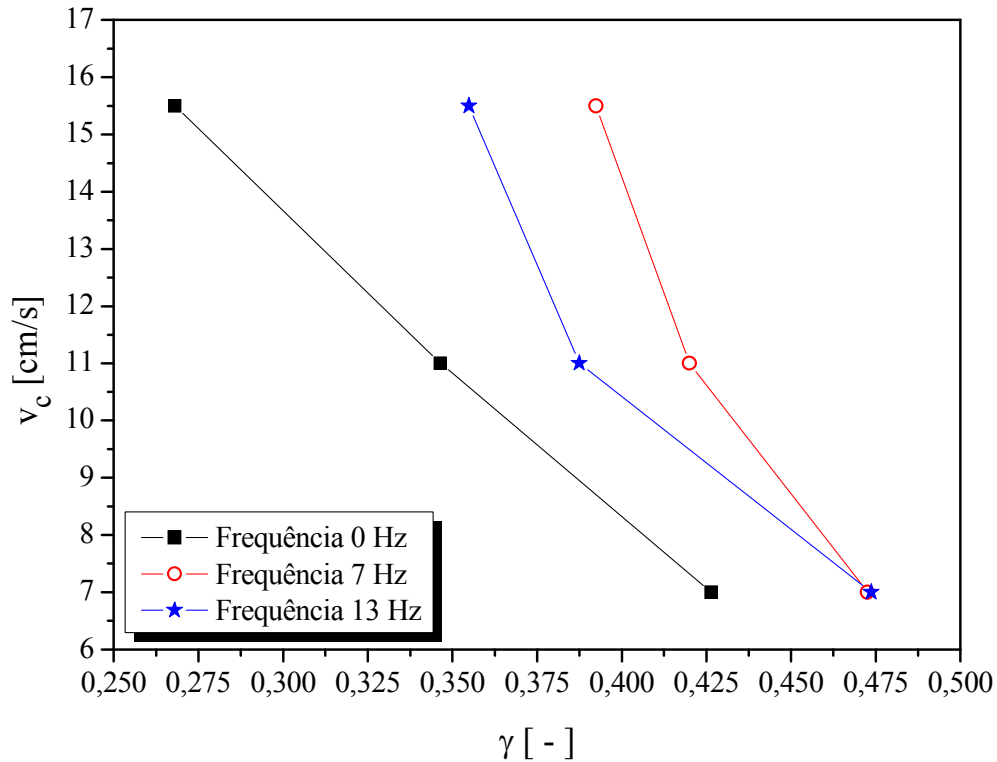


Figura 4.57 – Fração de massa retida (γ) por velocidade de limpeza (v_c); aterramento.

Verifica-se, na Figura 4.57, que o sistema estático, novamente, respondeu melhor à limpeza entre o primeiro e o segundo estágio ($v_c = 7$ cm/s e $v_c = 11$ cm/s), desprendendo mais massa que o sistema aterrado submetido à vibração de 7 Hz: a fração de massa retida no filtro do sistema estático diminuiu em 0,080, ao passo que no sistema vibrando, esse decréscimo foi de 0,050. Entre a segunda e a terceira limpeza, o decréscimo na fração de massa retida para o sistema estático foi, também, de 0,080, contra 0,030 para o sistema submetido à vibração. Ao final da limpeza, houve uma diferença em torno de 0,160 para a fração de massa retida entre a primeira e a última limpeza, no sistema estático, ao passo que, no sistema sob vibração de 7 Hz esse decréscimo total no valor da fração de massa retida foi de 0,080. Isso sugere maior eficiência de limpeza do sistema estático, em relação ao sistema com aterramento, submetido à vibração mecânica com frequência de 7 Hz.

Ainda na Figura 4.57, para a frequência de 13 Hz no sistema com aterramento, nota-se que houve maior desprendimento de massa entre a primeira e a segunda limpeza, em relação ao sistema estático, sendo $\Delta\gamma=0,086$. No entanto, entre a segunda e a terceira limpeza, a massa removida foi menor que no sistema estático, apresentando um valor de 0,030, para, no final das três limpezas reduzir um valor $\Delta\gamma=0,120$.

A fração de massa retida (γ) pela queda de pressão de limpeza (ΔP_L) é apresentada na Figura 4.58. Observa-se que a queda de pressão na torta logo após a primeira limpeza apresentou maior valor para o sistema submetido à vibração mecânica de 7 Hz.

A maior queda de pressão após a última limpeza foi observada para o sistema sob vibração de 13 Hz. A torta do sistema estático apresentou menor queda de pressão que a torta do sistema sob vibração ao final das três limpezas.

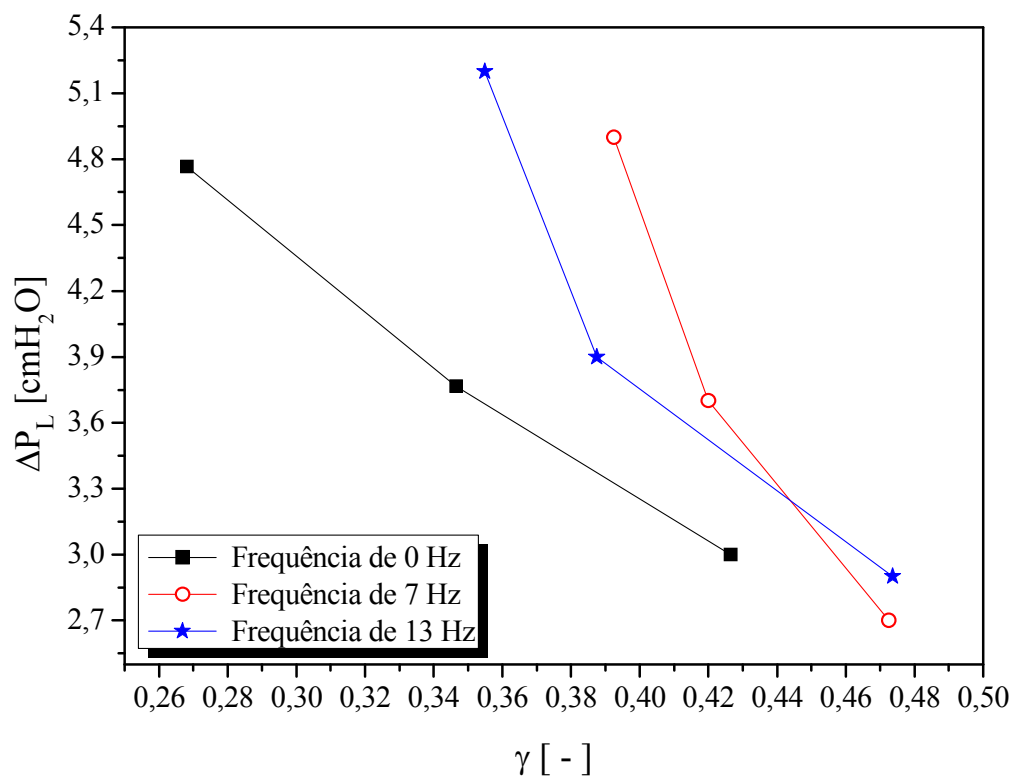


Figura 4.58 – Fração de massa retida (γ) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); aterramento.

A Figura 4.59 apresenta o gráfico de velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L). Seguindo a metodologia de Seville *et al.* (1989), foi realizada uma regressão linear dos pontos obtidos por interpolação a partir dos gráficos anteriores (Figuras 4.57 e 4.58).

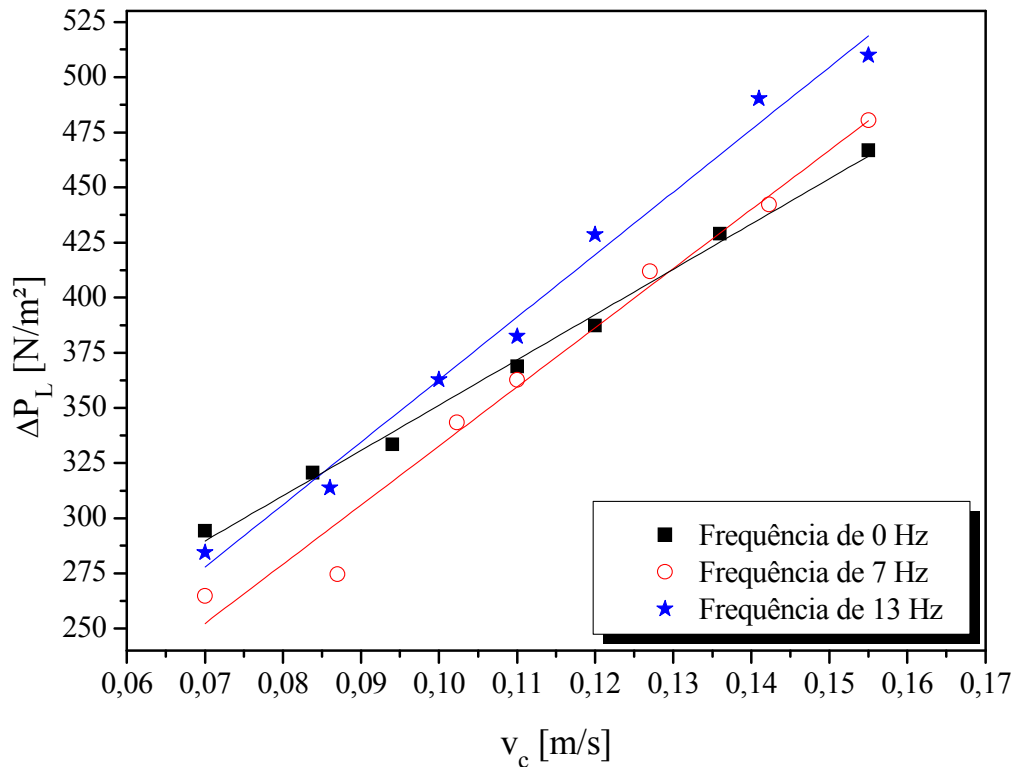


Figura 4.59 – Velocidade de limpeza (v_c) por queda de pressão na limpeza (ΔP_L); aterramento.

O coeficiente linear das retas, na Figura 4.59, corresponde à tensão de remoção da torta (σ). O coeficiente angular equivale à resistência específica do filtro (k_I). A força de adesão (F_c) foi obtida pelo uso da Equação (2.39).

A Tabela 4.7 apresenta os valores encontrados para os testes com aterramento do filtro, e a comparação com os resultados dos testes realizados sem aterramento do filtro.

Tabela 4.7 – Força de adesão para os testes com aterramento.

Frequência [Hz]	r^2	k_I [N.s/m ³]	σ_R [N/m ²]	F_c [N]
0	0,994	2054,1	145,8	2,23
7	0,995	2910,6	56,8	0,87
7 (aterramento)	0,976	2682,1	64,5	0,99
13	0,998	2527,8	89,3	1,36
13 (aterramento)	0,986	2835,3	79,3	1,21

Observa-se na Tabela 4.7 que o aterramento, para a frequência de 7 Hz, provocou aumento de 0,12 N na força de adesão do sistema vibrando a 7 Hz sem o aterramento, o que corresponde a um acréscimo de 13,6%. Houve também uma diminuição no valor da

resistência específica do filtro submetido à vibração de 7 Hz, no sistema com o aterramento. Para o sistema vibrando a 13 Hz, o aterramento ocasionou diminuição de cerca de 0,15 N no valor encontrado para o sistema sem aterramento, vibrando na mesma frequência, o que equivale a um decréscimo de 11,2%.

A presença de forças eletrostáticas podem proporcionar o aumento da eficiência de coleta (ZHOO *et al.*, 1990, *apud* STEFFENS, 2007), levando à formação de tortas menos compactas, ou mais porosas, que oferecem menor resistência ao escoamento do gás.

Para verificar se a vibração mecânica, por aumentar o atrito entre as partículas, exerceu alguma influência aumentando as forças eletrostáticas na torta de filtração, verificou-se a porosidade das tortas formadas nos sistemas com vibração, sem aterramento e com aterramento.

As Figuras 4.60 e 4.61 apresentam a comparação das porosidades das tortas formadas no sistema vibrando a 7 Hz (com aterramento e sem aterramento) e no sistema vibrando a 13 Hz (com aterramento e sem aterramento), respectivamente.

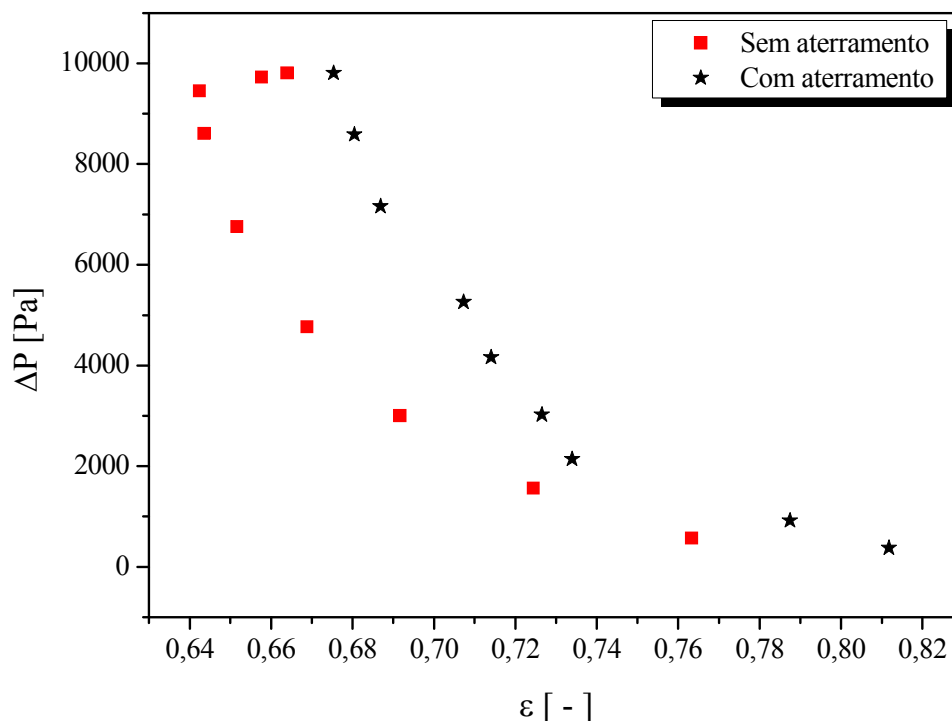


Figura 4.60 – Porosidade da torta nos sistemas com aterramento e sem aterramento (f: 7 Hz).

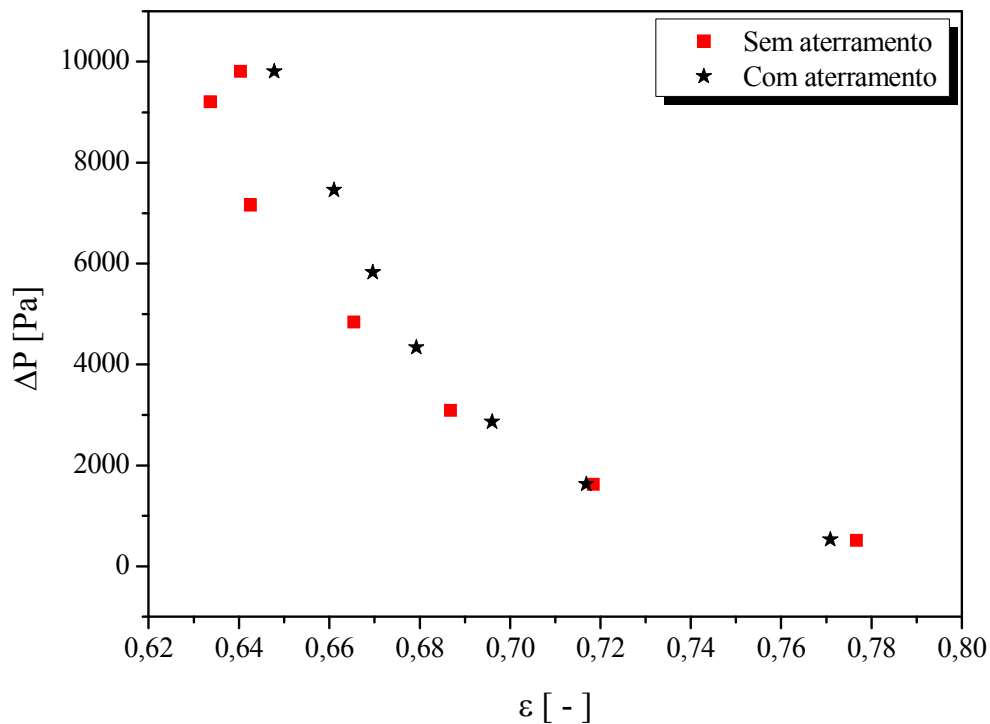


Figura 4.61 – Porosidade da torta nos sistemas com aterramento e sem aterramento (f: 13 Hz).

A análise das Figuras 4.60 e 4.61 permite observar que as tortas formadas no sistema com aterramento apresentaram maiores porosidades em relação às tortas formadas no sistema operando sem o aterramento do filtro.

Os resultados da Tabela 4.7, bem com os das Figuras 4.60 e 4.61, parecem indicar que, caso o sistema esteja sob influência de forças eletrostáticas, estas são desprezíveis quando comparadas às forças de Van der Waals que atuam entre as partículas, de acordo com o exposto na Seção 2.5 do Capítulo 2. Mesmo verificando que a porosidade das tortas formadas no sistema com aterramento alcançou maiores valores que a porosidade das tortas formadas no sistema sem aterramento, o que indica a presença de forças eletrostáticas na dinâmica do sistema, os resultados da Tabela 4.7 mostram que não houve diferença significativa nos valores de força de adesão encontrados em ambos os sistemas. Considera-se que, para pós secos, as forças predominantes na determinação da força de adesão são as forças de Van der Waals (FAUSTINO, 2010).

4.4.6 Outras Teorias

Outras metodologias foram testadas para efeito de comparação entre os diferentes materiais utilizados, a fim de que o efeito da vibração fosse melhor avaliado.

A Equação (2.41) fornece a força que atua sobre o elemento de torta situado sobre o meio filtrante, em limpeza do filtro por vibração mecânica, a qual depende da massa de pó depositada por unidade de área, da frequência e da amplitude da vibração.

O gráfico da Figura 4.62 apresenta a força calculada, para cada material estudado, em função da porosidade das tortas formadas sob influência da vibração mecânica de 7 e 13 Hz para a rocha moída, e 7 Hz para a rocha virgem e o polvilho.

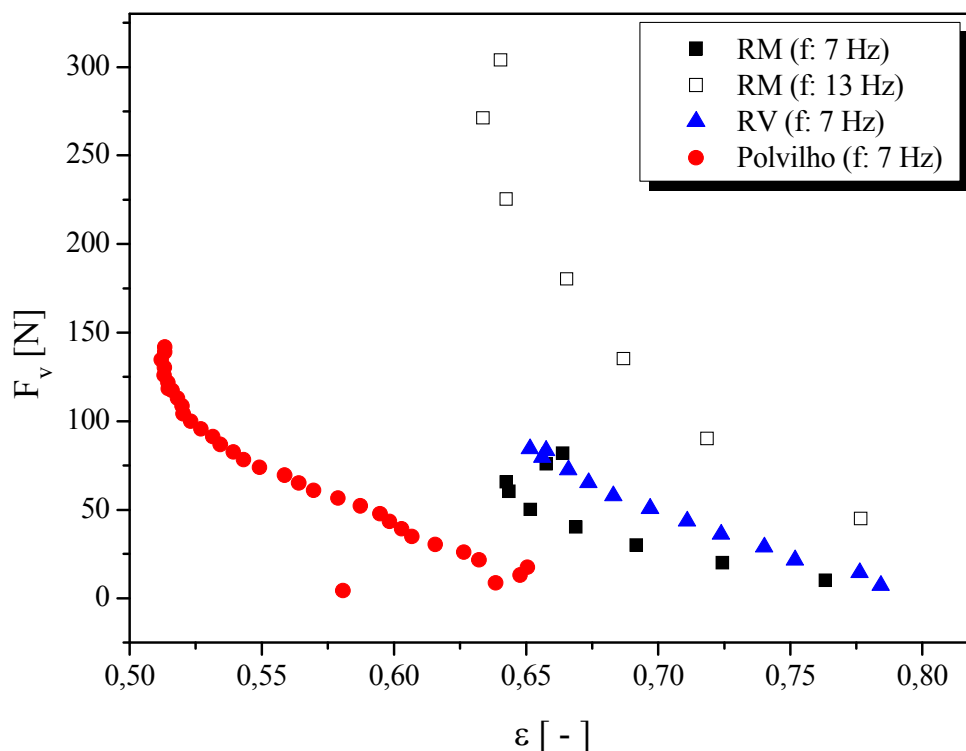


Figura 4.62 – Força que atua sobre o elemento de torta para os materiais particulados estudados, conforme teoria de Leith e Allen (1986).

Observa-se na Figura 4.62 que a força aumenta à medida que a porosidade das tortas diminui. A força que atua sobre o elemento de torta formado sob influência da vibração de 13 Hz, para a rocha fosfática moída, foi maior, para uma dada porosidade, que a força atuante sobre o elemento de torta do mesmo material, porém com frequência de vibração de 7 Hz. Comparando-se a rocha fosfática virgem com a rocha fosfática moída, com vibração de 7 Hz, observou-se que a força que atuou sobre o elemento de torta, considerando-se a mesma

porosidade para ambas as tortas, foi maior para a torta formada por partículas maiores, ou seja, a rocha fosfática virgem. As tortas de polvilho foram as que apresentaram menores porosidades, e, portanto, os maiores valores de força atuante sobre o elemento de torta situado sobre o meio filtrante.

A força de adesão entre a torta e o tecido também foi calculada utilizando-se as equações propostas por Rumpf (1962) e Kendall *et al.* (1986), conforme as Equações (2.34) e (2.36). Os resultados encontrados foram comparados com a força de adesão encontrada utilizando-se o método de Seville *et al.* (1989) e são apresentados na Tabela 4.8.

O maior problema encontrado para quantificar a força de adesão através das Equações de Rumpf (1962) e Kendall *et al.* (1986) foi devido à dificuldade em se determinar o valor da distância da separação efetiva entre as partículas. Neste trabalho, adotou-se valor de $a = 1,7 \cdot 10^{-9}$ m para a distância efetiva entre as partículas, retirado da Tabela 2.5 do Capítulo 2. Esse valor está no intervalo sugerido por Schubert (1981), que estabeleceu o valor de a entre $4 \cdot 10^{-10}$ e $4 \cdot 10^{-8}$. A constante de Hamaker, nos dois modelos propostos, depende das características do material e possui valores na ordem de grandeza de 10 a $20 \cdot 10^{-19}$ J. O valor da constante de Hamaker (H) utilizado neste trabalho foi de $8 \cdot 10^{-20}$ J, para a rocha fosfática e de $5,2 \cdot 10^{-20}$ J para o polvilho doce, conforme Felicetti (2008).

Tabela 4.8 – Cálculo da força de adesão por Seville, Rumpf e Kendall.

Material	Frequência [Hz]	Seville <i>et al.</i> (1989)	Rumpf (1962)	Kendall <i>et al.</i> (1986)
		Força de Adesão (N)		
Rocha Fosfática Moída	0	2,23	4,52	1,47
	7	0,87	4,32	1,31
	13	1,36	4,79	1,72
Rocha Fosfática Virgem	0	1,28	3,19	0,88
	7	1,24	3,48	1,11
Polvilho Doce	0	0,25	0,99	0,66
	7	0,63	1,03	0,73

Verifica-se que, exceto para a rocha moída em sistema operando a 7 Hz, os valores de força de adesão encontrados para a rocha fosfática pela metodologia de Seville *et al.* (1989) foram intermediários aos valores calculados pelos modelos de Rumpf (1962) e Kendall

et al. (1986). Para o polvilho doce, os valores de força de adesão encontrados pelo uso dos três modelos são próximos, mostrando uma boa aplicabilidade dos métodos para as partículas de polvilho. Isso provavelmente se deva à forma das partículas, que, para o polvilho, se aproximaram da esfericidade.

Nota-se que, para o mesmo material, a força de adesão calculada pelos modelos de Rumpf (1962) e Kendall *et al.* (1986) teve valores próximos, não apresentando diferença significativa quanto à influência da frequência de vibração. Nesses modelos (Equações 2.34 e 2.36), a única variável de valor conhecido que pode carregar em si as influências da vibração mecânica é a porosidade da torta de filtração, estudada na Seção 4.3. A outra variável que poderia fornecer informações sobre a influência da vibração na estrutura das tortas é a distância de separação efetiva, a , entre a partícula e o substrato, que é uma grandeza que determina o grau de compressibilidade da torta (BARROS, 2010). No entanto, não se tem conhecimentos sobre como efetuar a medida experimental dessa grandeza, que deve ser calculada pela Equação (2.30), a qual é em função da força de adesão.

Percebe-se uma discrepância entre os valores expostos na Tabela 4.8 e os valores do gráfico da Figura 4.62, no qual a força de adesão foi calculada pelo modelo proposto por Leith e Allen (1986). Vale destacar que cada modelo proposto tem sua aplicabilidade limitada pelas condições específicas dos equipamentos utilizados nos ensaios, como: formato e tamanho do meio filtrante (disco ou manga), massa do equipamento vibratório e motor utilizado para imprimir a vibração, dentre outros. Os valores encontrados para a força de adesão pelas metodologias de Seville *et al.* (1989), Rumpf (1962) e Kendall *et al.* (1986) se aproximam dos valores encontrados na literatura, nos trabalhos de Aguiar e Coury (1991) e Nóbrega e Coury (1992).

4.5 Ciclos de Filtração

A influência da vibração mecânica em experimentos seriados de filtração, nos quais há a realização de vários ciclos de vibração com a reutilização do meio filtrante após a limpeza, foi analisada nesta etapa.

Foram realizados 10 ciclos de filtração para a rocha moída, em filtro de poliéster, com velocidade de filtração de 10 cm/s e vazão mássica de alimentação de pó de 0,183 g/s. O

procedimento utilizado está descrito na Seção 3.4.6 do Capítulo 3. Avaliou-se 10 ciclos com o sistema estático e 10 ciclos com o sistema atuando sob vibração de 7 Hz.

As Figuras 4.63 e 4.64 mostram o resultado dos 10 ciclos para o sistema estático e para o sistema submetido à vibração mecânica, respectivamente.

Para a construção dos gráficos das Figuras 4.63 e 4.64, a massa final do primeiro ciclo foi somada à massa filtrada do segundo ciclo, e assim sucessivamente, até o décimo ciclo.

Uma avaliação preliminar da Figura 4.63 mostra a carga mássica (W) de cada ciclo em relação à progressão da queda de pressão na torta, para os 10 ciclos de filtração no sistema estático. Observa-se um período de filtração interna no primeiro ciclo, como já foi discutido no Subitem 4.4.1. No entanto, a partir do segundo ciclo, o comportamento da curva de filtração para cada ciclo foi linear (filtração de superfície). Nota-se também, como era esperado, um decréscimo na massa acumulada por unidade de área em cada ciclo. Isso é explicado pela tendência de saturação do tecido, uma vez que há retenção de partículas no filtro após a limpeza.

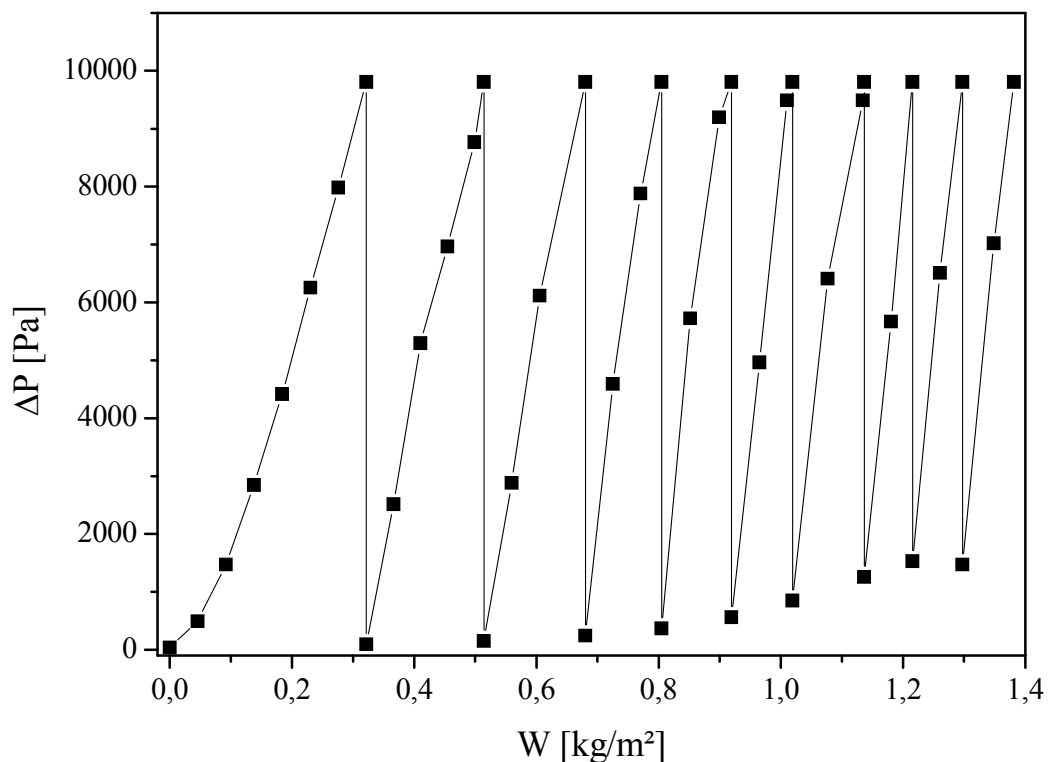


Figura 4.63 – Curvas de filtração para os 10 ciclos no sistema estático.

O resultado para os 10 ciclos de filtração com o sistema operando sob a influência de vibração mecânica com frequência de 7 Hz é apresentado na Figura 4.64. Pôde-se observar que houve um período de filtração interna no primeiro ciclo, conforme os resultados do Subitem 4.4.1. No segundo e no terceiro ciclo, houve indícios bem discretos da existência de filtração interna. No entanto, nota-se que a partir do quarto ciclo, o comportamento da curva de filtração foi linear, apontando para uma filtração de caráter superficial nesses ciclos. Foi possível observar que houve um decréscimo na massa filtrada em cada ciclo subsequente, devido à retenção de partículas no interior do filtro depois do procedimento de limpeza.

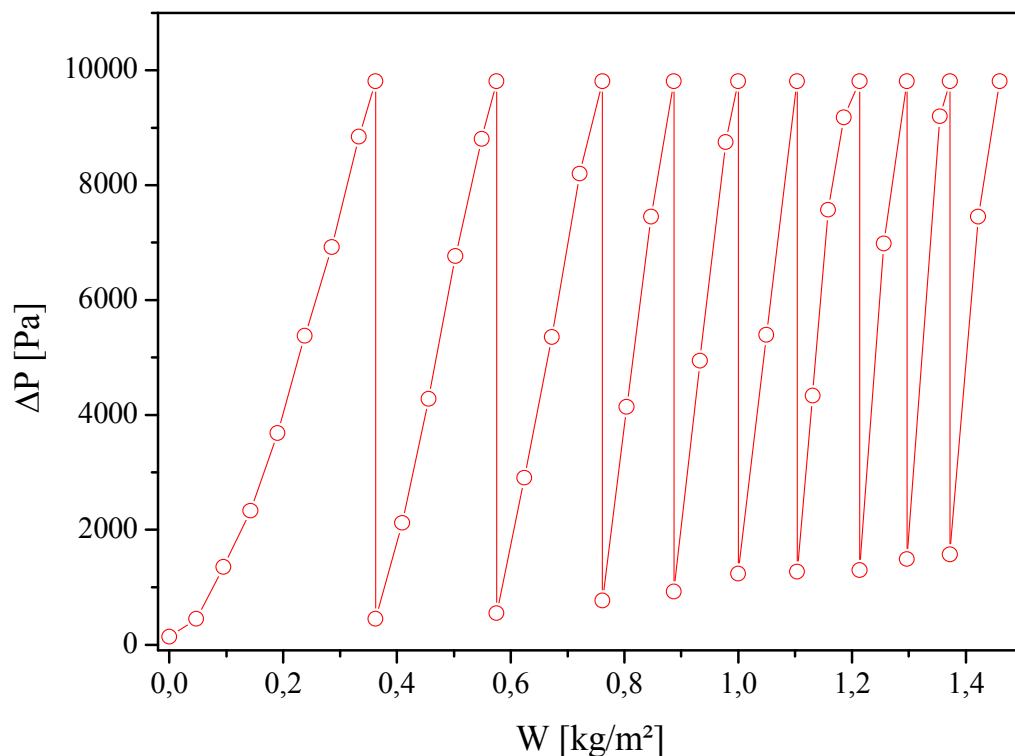


Figura 4.64 – Curvas de filtração para os 10 ciclos no sistema com vibração de 7 Hz.

Como o objetivo dessa etapa foi avaliar se havia diferenças no comportamento dos ciclos entre o sistema estático e o sistema com vibração, os resultados podem ser analisados a partir de gráficos comparativos para os 10 ciclos de filtração. A Figura 4.65 mostra a comparação dos 10 ciclos para os dois sistemas avaliados.

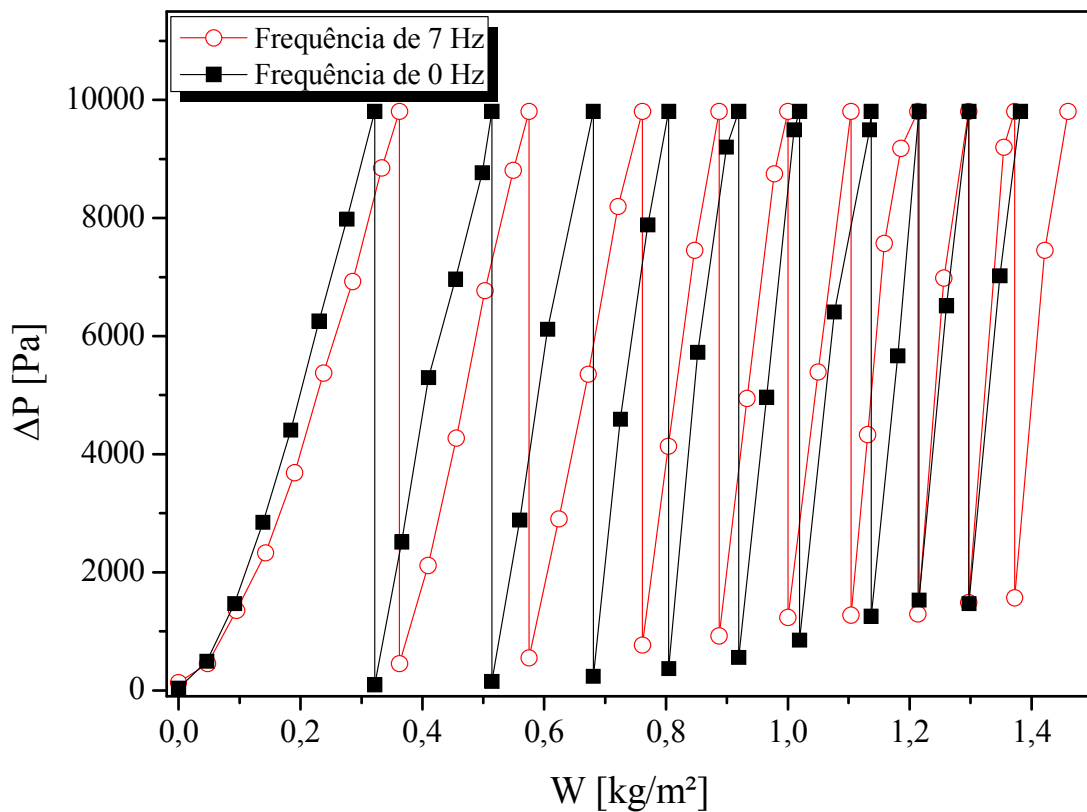


Figura 4.65 – Comparação dos 10 ciclos de filtração entre o sistema estático e o sistema com vibração.

Na Figura 4.65, foi possível observar que houve diferenças nos ciclos para os dois sistemas avaliados (0 Hz e 7 Hz). No entanto, para possibilitar uma melhor avaliação, os resultados serão apresentados em gráficos comparativos para cada ciclo.

A Figura 4.66 apresenta o ajuste da curva de filtração do primeiro ciclo para o sistema vibrando a 7 Hz juntamente com a curva do primeiro ciclo do sistema estático. Os parâmetros de todos os ajustes das curvas de filtração estão expostos no Apêndice A.

Observa-se na Figura 4.66 que, em ambos os sistemas testados, no primeiro ciclo houve um período de filtração interna para o sistema, caracterizado, na curva de filtração, pela concavidade para cima. Durante o período de filtração interna, as partículas se acomodam entre as fibras no interior do meio filtrante. As curvas de filtração de ambos os sistemas apresentaram comportamentos semelhantes para o filtro limpo.

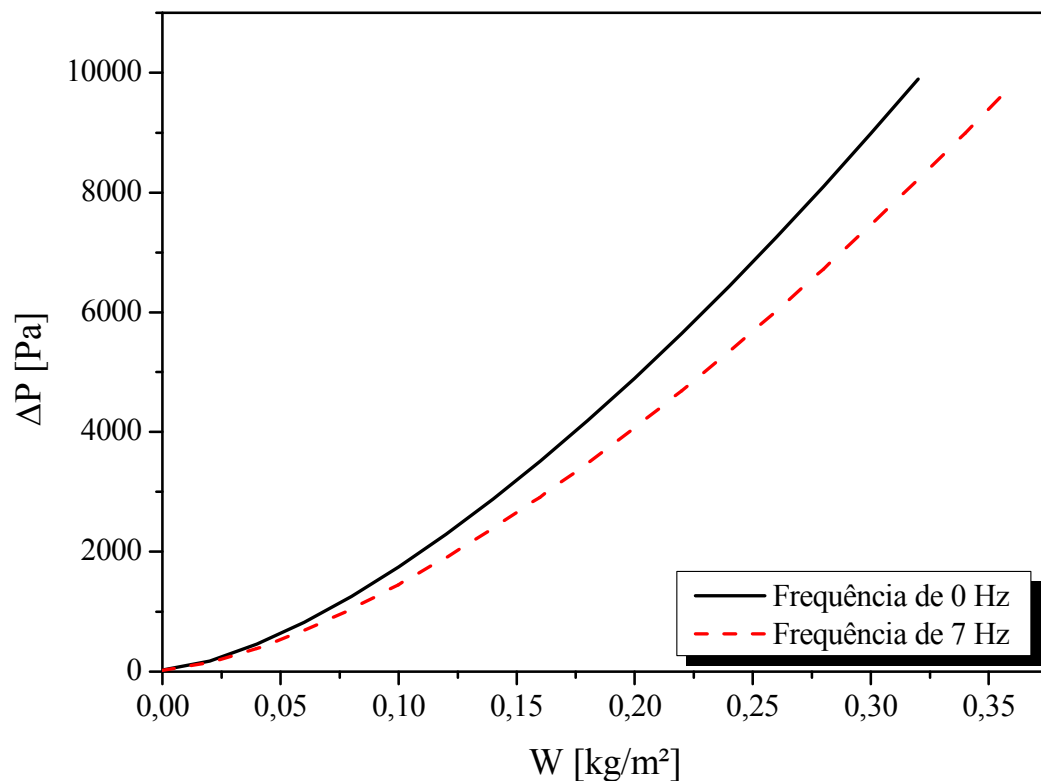


Figura 4.66 – Comparação para o primeiro ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

A Figura 4.67 apresenta o ajuste da curva de filtração do segundo ciclo para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático. Foi possível notar, na Figura 4.67, que para o sistema estático, o segundo ciclo de filtração apresentou um comportamento linear, caracterizado pela filtração de superfície, no qual as partículas se acumulam umas sobre as outras, na superfície do meio filtrante, não penetrando entre as fibras, como ocorreu no primeiro ciclo. Isso ocorreu devido à massa de partículas que ficou retida no filtro logo após a primeira limpeza, o que tende a saturar o tecido. Para o sistema submetido à vibração mecânica, observa-se que houve um período muito curto de filtração interna. Isso sugere que a acomodação das partículas devido à influência da vibração, permitiu ainda um rearranjo no interior do filtro, depois da primeira limpeza, de maneira a permitir que a filtração interna ocorresse, ainda que por um período muito breve. Esse comportamento diferencia-se da tendência dos resultados do sistema estático.

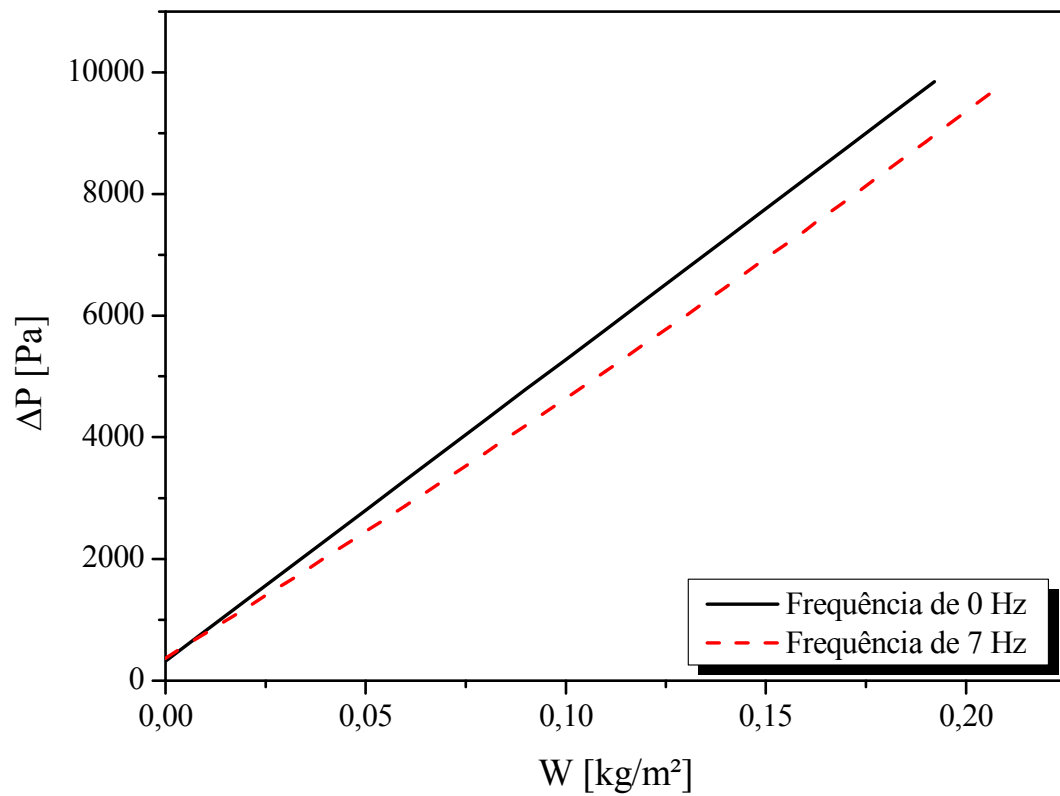


Figura 4.67 – Comparação para o segundo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

A Figura 4.68 apresenta o ajuste da curva de filtração do terceiro ciclo para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático.

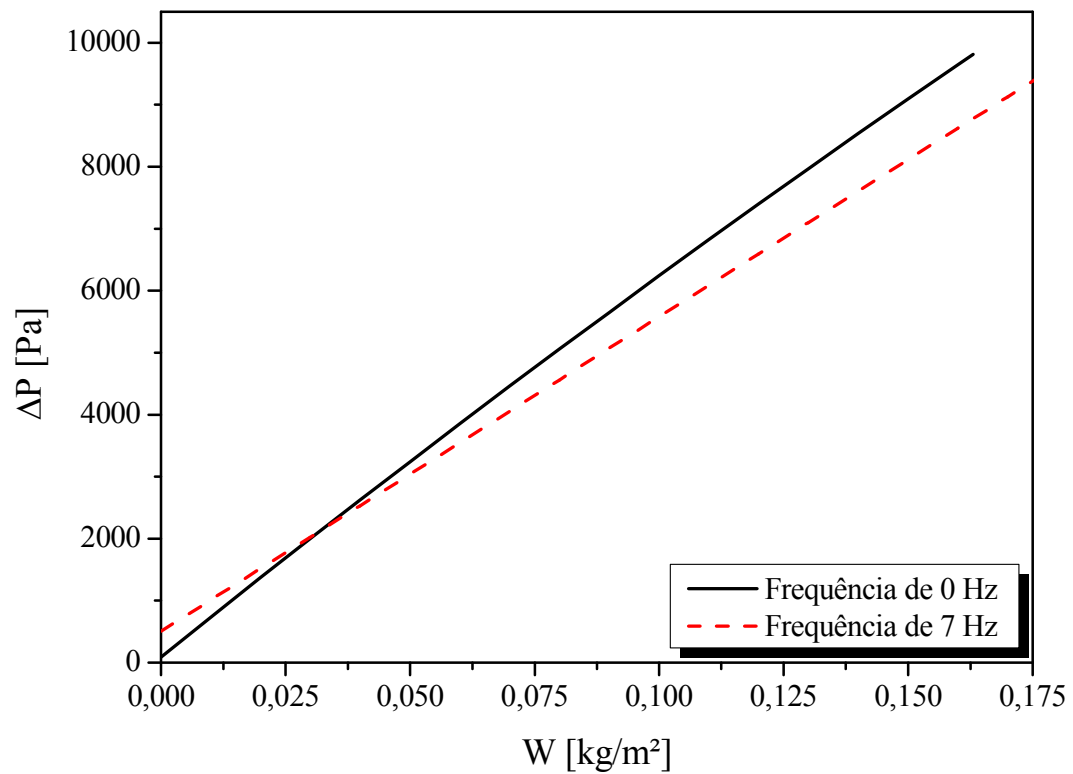


Figura 4.68 – Comparação para o terceiro ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

No terceiro ciclo, verificou-se, pela Figura 4.68, uma concavidade bastante discreta, para cima, bem no início do experimento submetido à vibração. No entanto, o comportamento característico da curva de filtração para o sistema vibrando foi linear, apontando para uma filtração sobre a superfície do meio filtrante.

Na curva de filtração do terceiro ciclo do sistema estático, observou-se que no início do ensaio, a filtração foi caracteristicamente de superfície, devido ao comportamento linear da curva. Todavia, pôde-se notar que com o decorrer do experimento, uma curvatura para baixo começa a despontar. Isso indicou um período de rápida formação da torta. Esse parece ser um ciclo de transição para ambos os sistemas: para o estático, transição entre a filtração superficial e o período de rápida formação da torta; para o sistema sob vibração, transição entre a filtração interna e a filtração de superfície. Tal fato comprovou que a quantidade de massa retida no terceiro ciclo, após a segunda limpeza, mudou o comportamento das curvas de filtração para ambos os sistemas.

A Figura 4.69 e a Figura 4.70 apresentam o ajuste das curvas de filtração do quarto e do quinto ciclos, respectivamente, para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático.

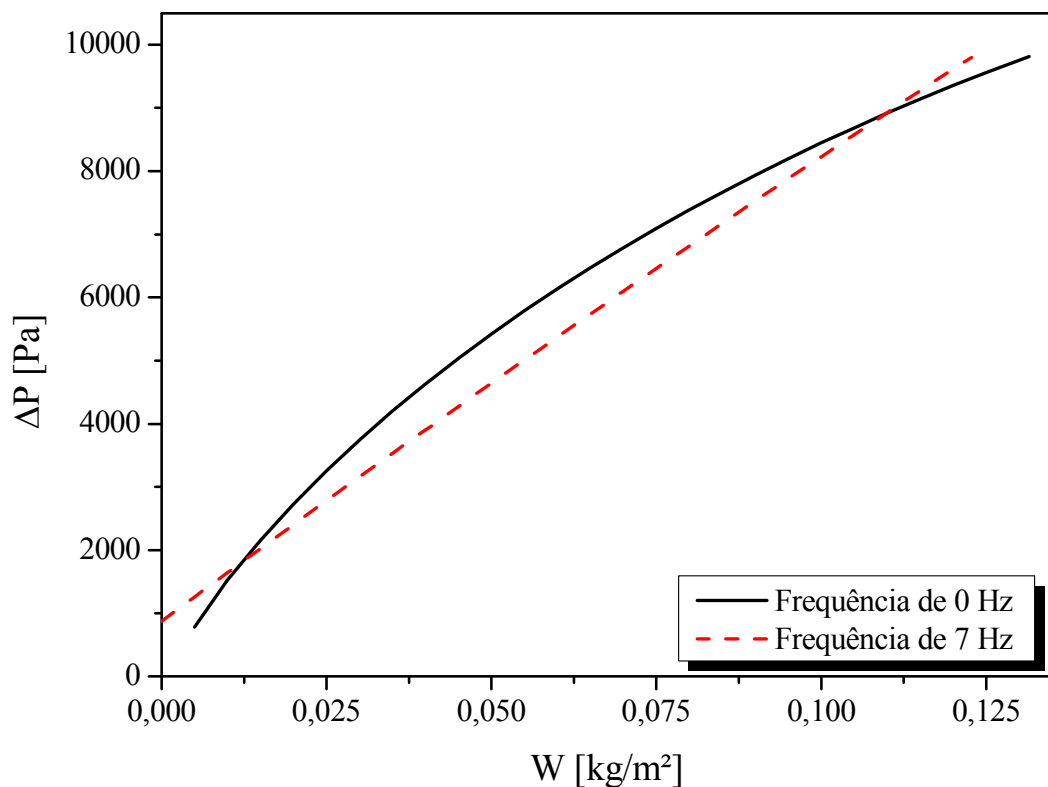


Figura 4.69 – Comparação para o quarto ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

Pelas Figuras 4.69 e 4.70 foi possível observar que, no quarto e quinto ciclos, no sistema submetido à vibração, a filtração foi tipicamente superficial, dado o comportamento linear das curvas de filtração. Para o sistema estático, o ciclo 4 e o ciclo 5 foram caracterizados por uma filtração na qual há um rápido aumento da queda de pressão, ou seja, a formação da torta ocorre de forma muito rápida. Nesses ciclos, houve diferença na tendência das curvas de filtração dos sistemas avaliados.

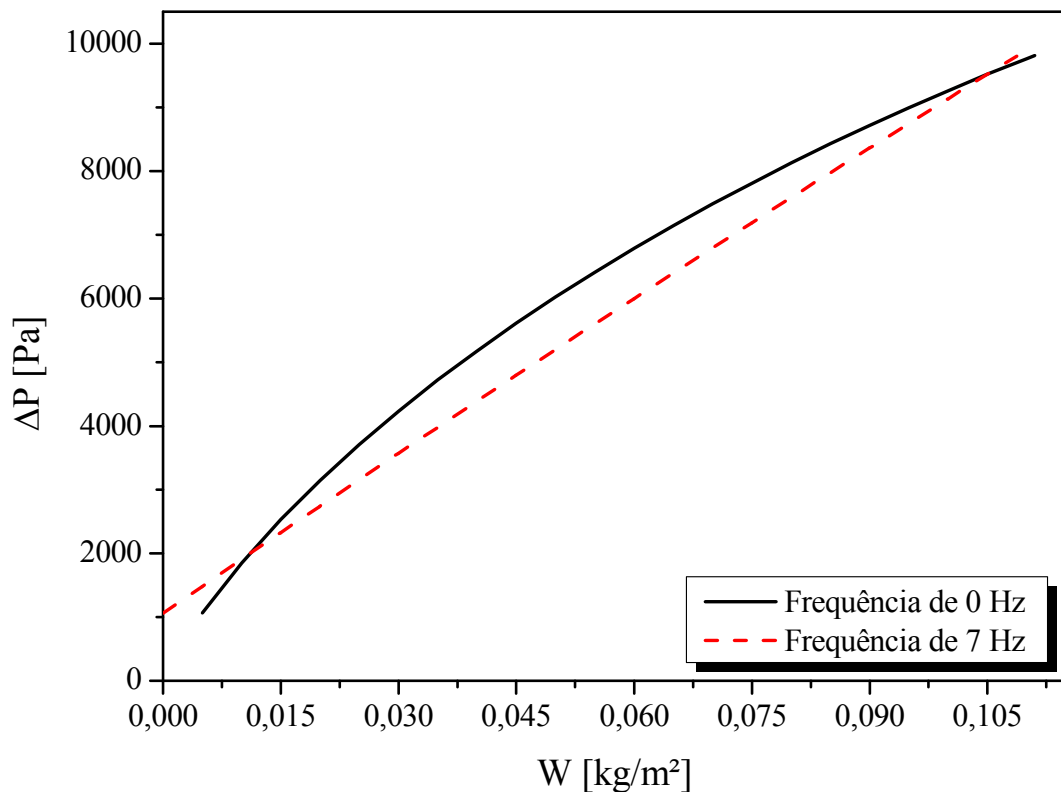


Figura 4.70 – Comparação para o quinto ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

A Figura 4.71 apresenta o ajuste da curva de filtração do sexto ciclo para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático. Foi possível se observar que, em ambos os sistemas, o sexto ciclo foi notadamente de característica linear, apontando para a filtração de superfície, tanto no sistema estático quanto no sistema sob vibração mecânica.

A Figura 4.72 apresenta o ajuste da curva de filtração do sétimo ciclo para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático.

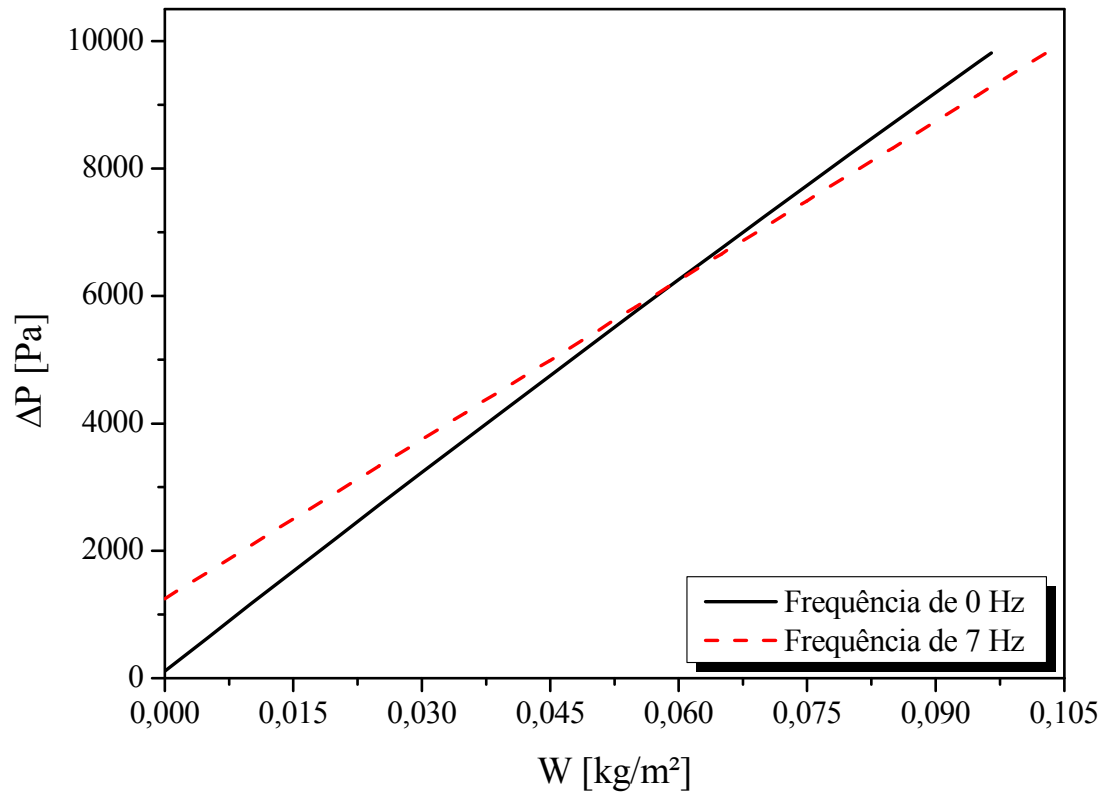


Figura 4.71 – Comparação para o sexto ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

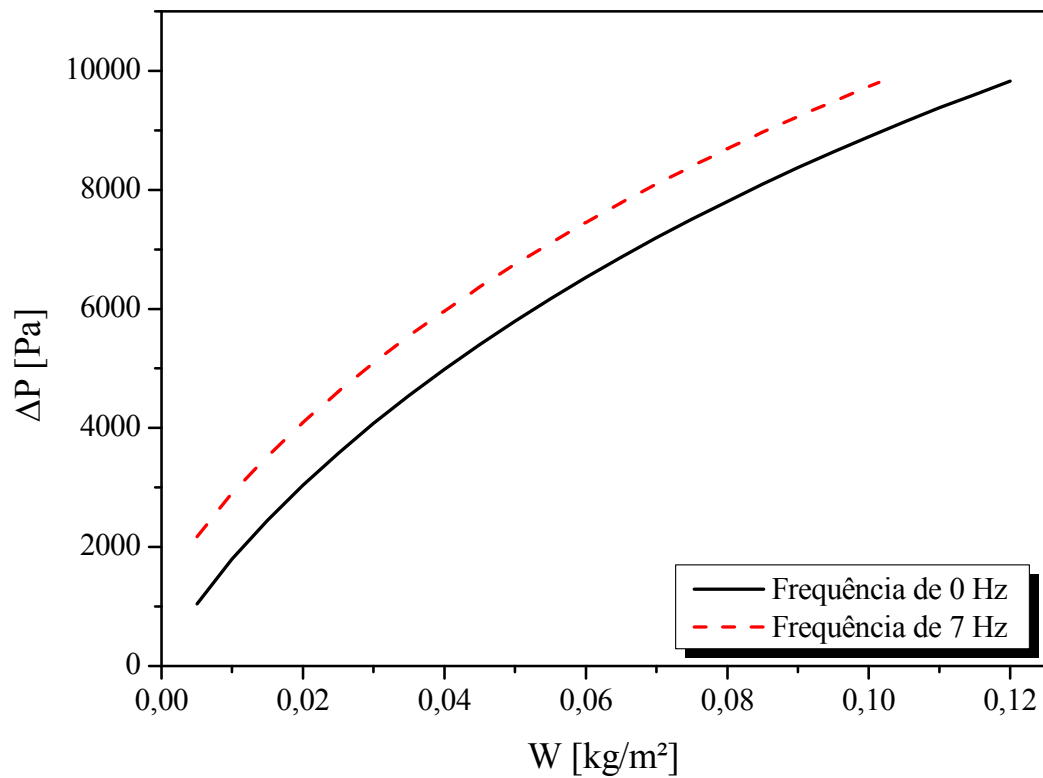


Figura 4.72 – Comparação para o sétimo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

No sétimo ciclo, conforme a Figura 4.72, observou-se que em ambos os sistemas, as curvas de filtração apresentaram concavidade para baixo, o que apontou para um rápido aumento da queda de pressão. Nesses testes, a formação da torta ocorre de maneira muito rápida, tanto para o sistema submetido à vibração mecânica quanto para o sistema estático. Nota-se também que, a partir do sétimo ciclo, o sistema sob influência da vibração mecânica passou a apresentar maior queda de pressão para uma dada massa acumulada por unidade de área, em relação ao teste estático. Isso sugere que a frequência de vibração imprimida no sistema de filtração influenciou desfavoravelmente na acomodação das partículas no interior do meio filtrante, levando o sistema a apresentar maior queda de pressão para uma quantidade menor de material pulverulento, quando comparado ao sistema estático.

As Figuras 4.73 a 4.75 apresentam os ajustes das curvas de filtração do oitavo, nono e décimo ciclos para o sistema vibrando a 7 Hz e para o sistema estático.

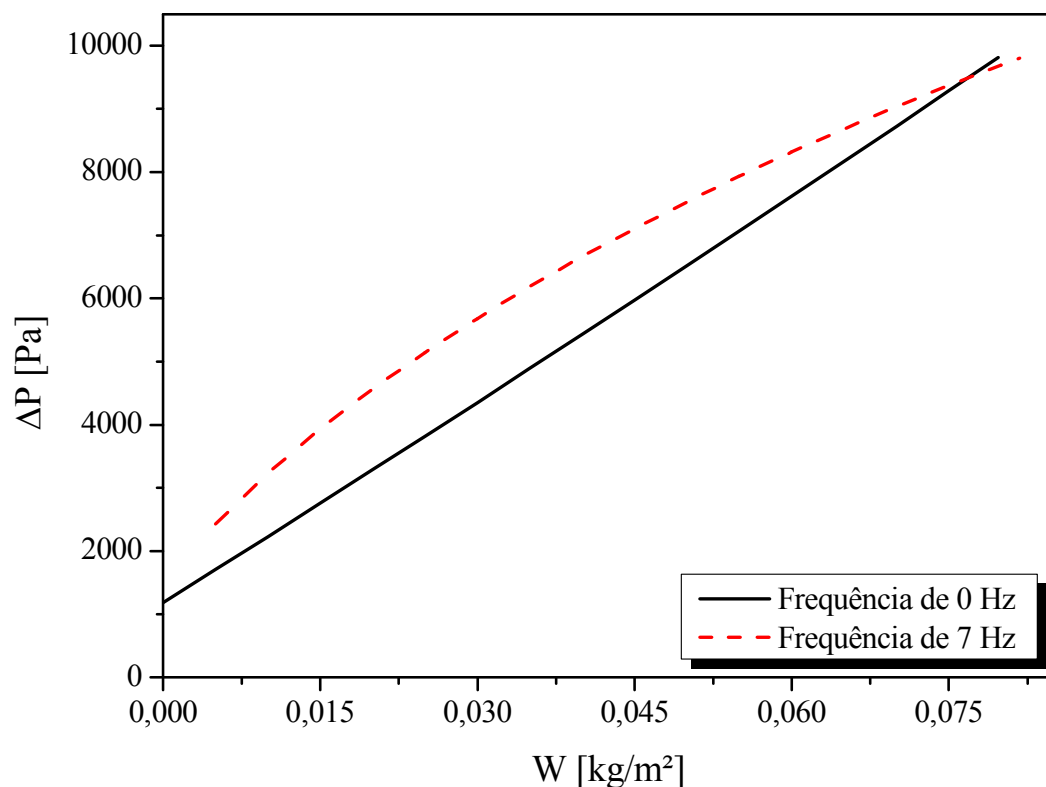


Figura 4.73 – Comparação para o oitavo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

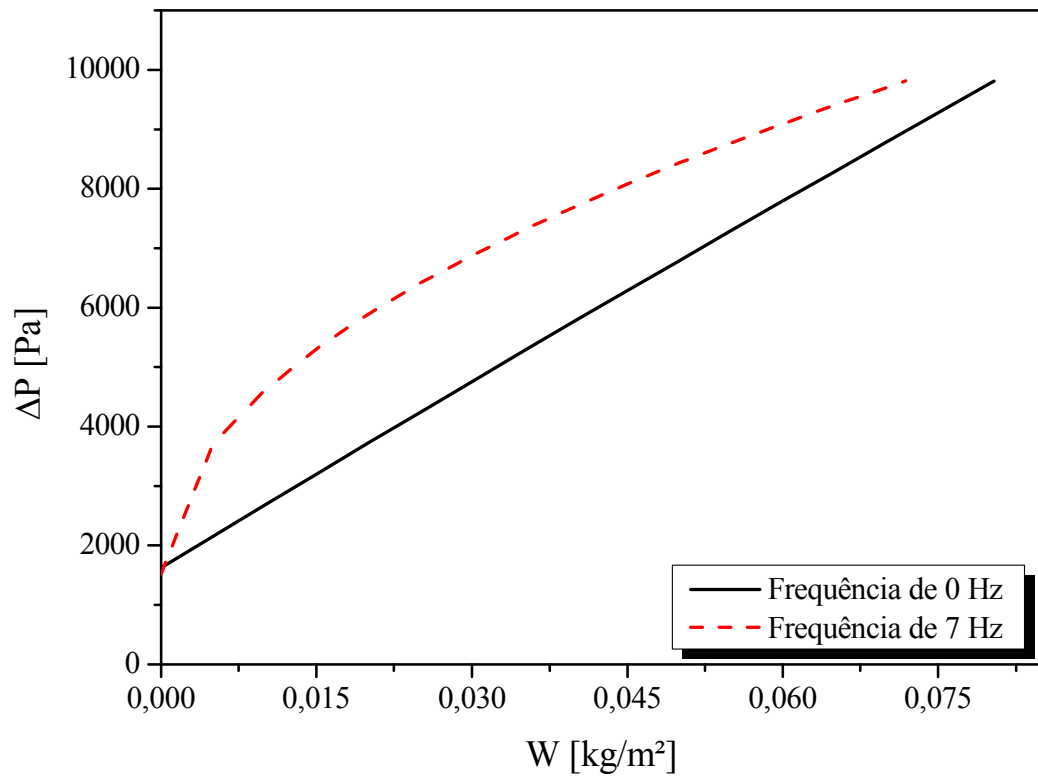


Figura 4.74 – Comparação para o nono ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

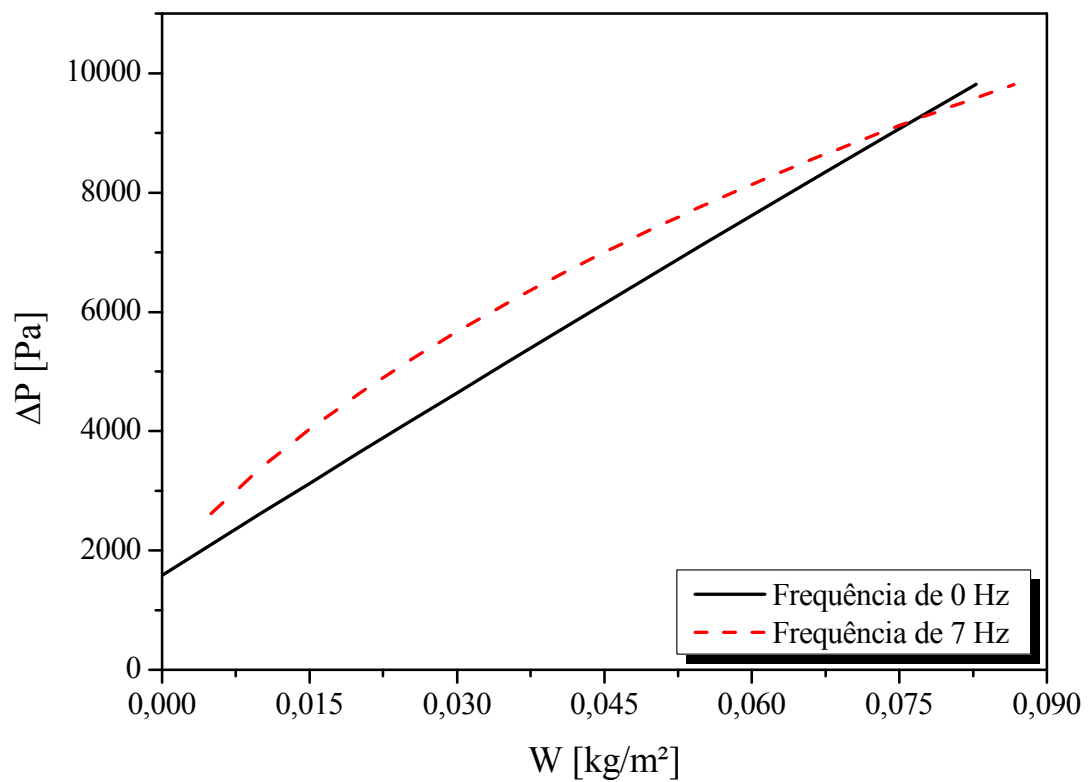


Figura 4.75 – Comparação para o décimo ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

Foi possível se observar nas Figuras 4.73 a 4.75 que nos ciclos 8, 9 e 10, para o sistema estático a filtração volta a ser caracteristicamente superficial, devido ao comportamento linear das curvas de filtração. Pôde-se inferir para essa situação que, após sete limpezas, as partículas retidas no interior do meio filtrante se acomodaram de maneira a permitirem que o sistema voltasse ao estágio intermediário entre as concavidades das curvas de filtração, ou seja, à condição de filtração de superfície, menos estável que a filtração interna, porém, mais estável que o estágio de rápido aumento de queda de pressão.

Para o sistema submetido à vibração mecânica, conforme as Figuras 4.73 a 4.75, observa-se que, nos três últimos ciclos, a curva de filtração teve sua concavidade voltada para baixo, após a sétima, a oitava e a nona limpeza. Isso pôde indicar que a vibração mecânica na filtração exerceu uma influência desfavorável na acomodação das partículas. A concavidade para baixo é resultado de uma filtração na qual ocorre rápida elevação da queda de pressão, o que aumentou a instabilidade do sistema em relação aos ciclos anteriores, nos quais o comportamento da curva era linear.

Uma constatação importante, ao se avaliar todos os 10 ciclos de filtração para ambos os sistemas, é a de que o sistema sob vibração parece acompanhar o comportamento do sistema estático, porém, com até dois ciclos de atraso. Isso pode indicar que a limpeza por fluxo de ar reverso, do sistema de filtração, conduz as partículas, ciclo a ciclo, a um melhor arranjo em sua acomodação interna, até que estas, no filtro submetido à vibração mecânica, atinjam a posição de equilíbrio do sistema estático.

A Figura 4.76 mostra a massa acumulada por unidade de área (W), a massa desprendida por unidade de área (W_D) e a massa retida por unidade de área (W_R), no decorrer dos 10 ciclos de filtração, para o sistema com vibração de 7 Hz e para o sistema estático.

A observação superficial da Figura 4.76 permitiu constatar que houve muita semelhança entre os valores de massa acumulada, desprendida e retida, por unidade de área, para o sistema sob influência de vibração e para o sistema estático.

Para melhor avaliação das diferenças entre o sistema estático e o sistema submetido à vibração, a Figura 4.77 apresenta a massa acumulada por unidade de área para cada ciclo, em ambos os sistemas.

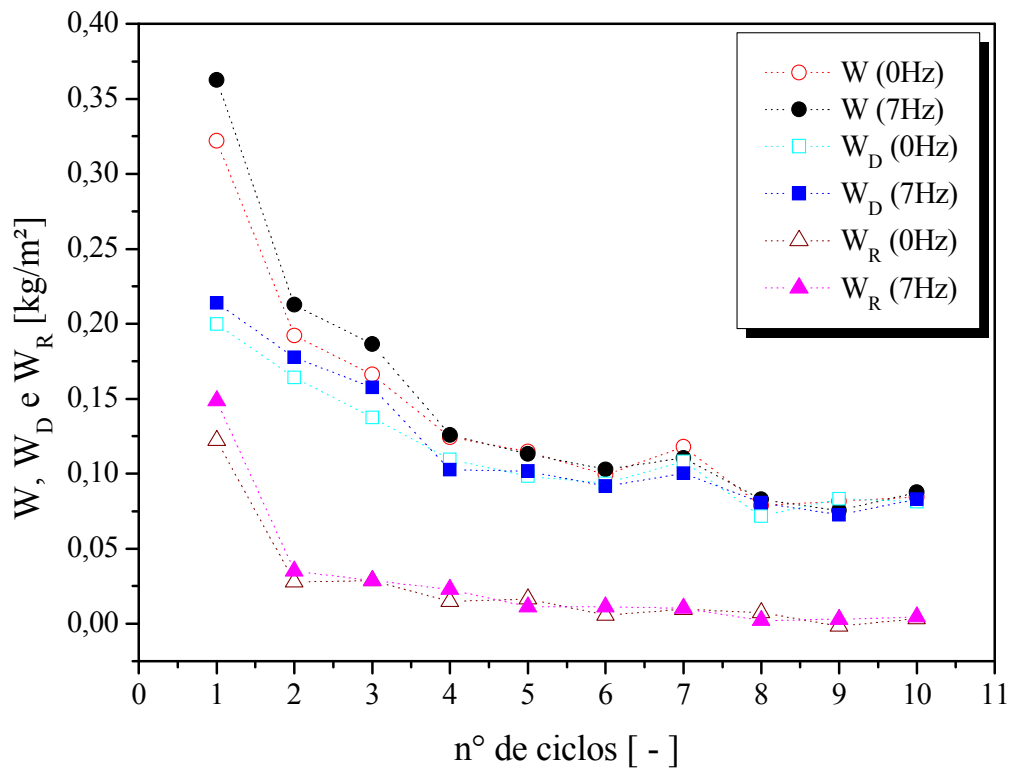


Figura 4.76 – Massa acumulada (W), massa despreendida (W_D) e massa retida (W_R) por unidade de área, para os 10 ciclos de filtração (f: 0 e 7 Hz).

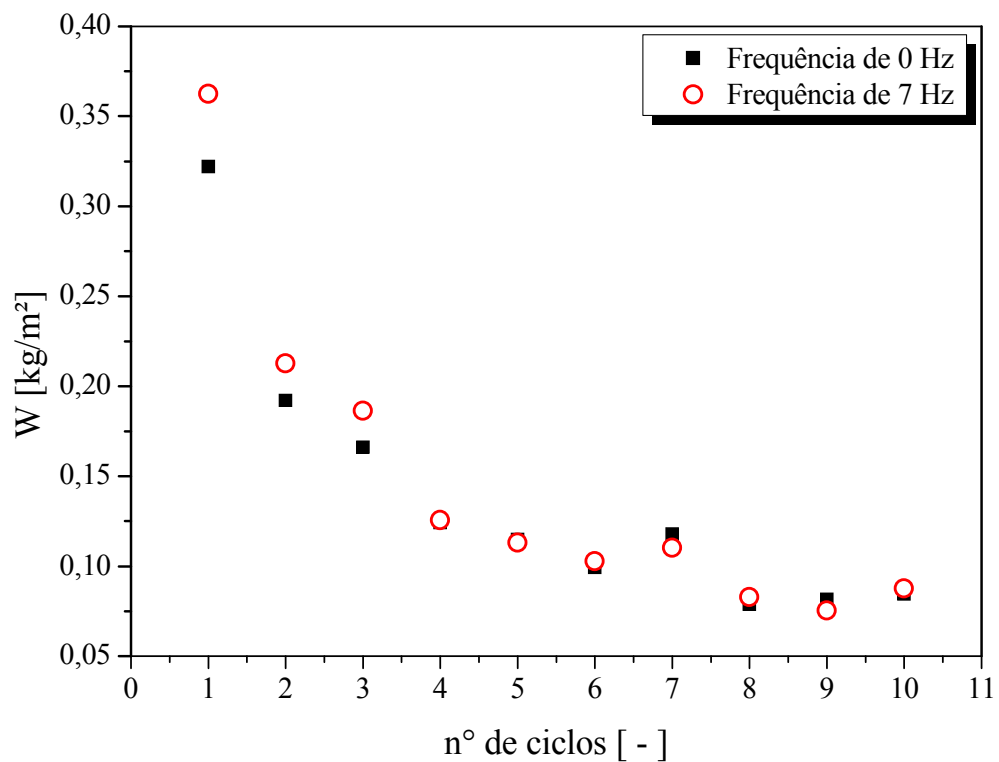


Figura 4.77 – Massa acumulada por unidade de área para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

Verifica-se, na Figura 4.77, que nos três primeiros ciclos, a massa acumulada por unidade de área no sistema submetido à vibração foi maior que a massa acumulada por unidade de área no sistema estático. No entanto, a partir do quarto ciclo, o valor da massa acumulada por unidade de área igualou-se, em ambos os processos, mantendo uma diferença pouco significativa, até o último ciclo, para os dois sistemas avaliados. Isso parece indicar que, embora a vibração interferisse na acomodação das partículas no interior do meio filtrante, houve um rearranjo na acomodação das partículas retidas no filtro durante o processo de limpeza por ar reverso, o que acabou por controlar a filtração seguinte à limpeza, levando tanto o sistema estático quanto o sistema sob influência de vibração, à estabilidade na filtração, com o decorrer dos ciclos. Observou-se que a massa média coletada nos últimos 3 ciclos foi em torno de 0,080 kg/m², tanto para o sistema estático quanto para o sistema sob influência de vibração mecânica.

As diferenças da massa desprendida em cada ciclo, entre o sistema estático e o sistema submetido à vibração, é apresentada na Figura 4.78.

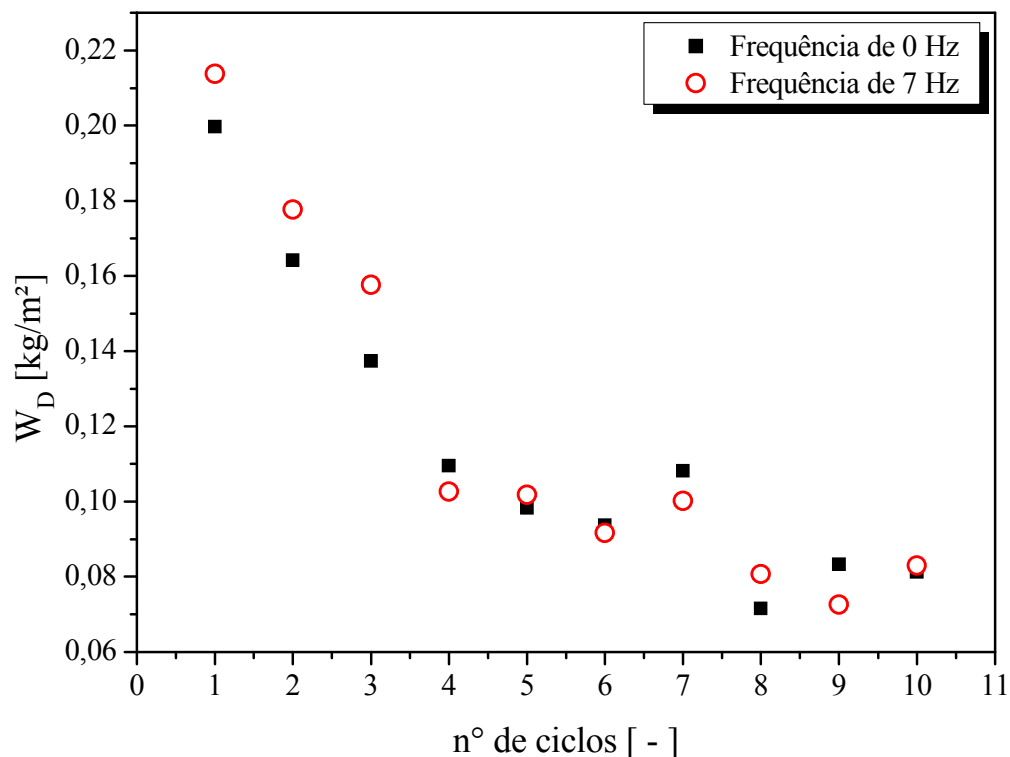


Figura 4.78 – Massa desprendida por unidade de área para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

Analisando-se a Figura 4.78, percebe-se que nos três primeiros ciclos, houve maior desprendimento de massa para o sistema submetido à vibração. Depois do terceiro ciclo, ambos os sistemas tenderam a uma estabilização. Nos quatro ciclos intermediários (ciclos 4,

5, 6 e 7), a média de massa desprendida foi cerca de 0,105 kg/m². A média de massa desprendida, por unidade de área, nos últimos 3 ciclos é de 0,080 kg/m². No último ciclo, a diferença entre as massas tornou-se insignificante, o que pode indicar que o sistema estava chegando à sua estabilidade.

Para uma melhor avaliação da diferença entre a massa retida no filtro do sistema estático e do sistema submetido à vibração, a Figura 4.79 apresenta os valores obtidos em cada ciclo de filtração.

Uma análise na Figura 4.79 permite observar que houve maior massa retida no filtro do sistema sob vibração após a primeira limpeza. Essa diferença diminuiu substancialmente no segundo ciclo. A partir do terceiro ciclo, observa-se que ambos os sistemas tenderam a se equilibrar. A média final de massa retida nos últimos três ciclos, em ambos os sistemas, foi em torno de 0,004 kg/m².

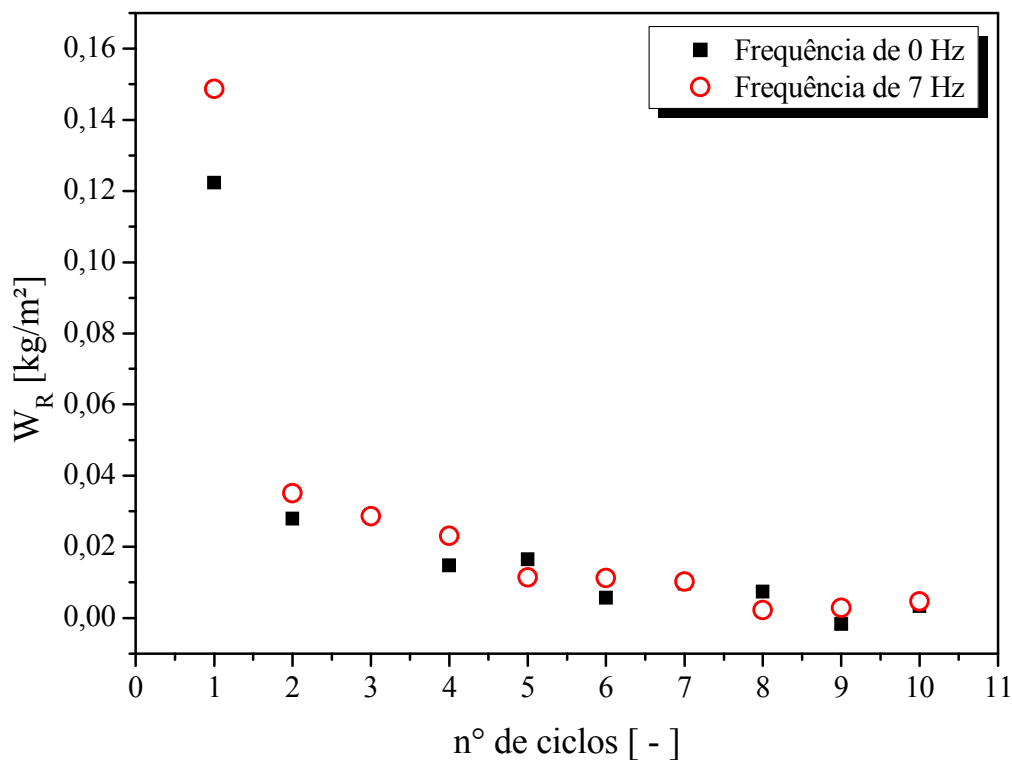


Figura 4.79 – Massa retida por unidade de área para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

A Figura 4.80 apresenta a queda de pressão residual após cada limpeza, para cada ciclo de filtração, no sistema estático e no sistema funcionando sob vibração de 7 Hz de frequência.

Os valores de queda de pressão residual apresentados na Figura 4.80, analisados juntamente com os valores de massa depositada por unidade de área (W), massa desprendida por unidade de área (W_D) e massa retida por unidade de área (W_R), nas Figuras 4.77 a 4.79, mostraram que limpeza por ar reverso tendeu a igualar o sistema sob influência de vibração ao sistema estático.

Pôde-se inferir, considerando-se os resultados avaliados para os ensaios de ciclos de filtração, que os efeitos da vibração mecânica durante a filtração, mostrados e analisados nas seções anteriores, parecem ser ocultados nos testes de ciclos, pela atuação da limpeza por ar reverso.

Há a impressão de a limpeza por fluxo de ar reverso exerceu uma influência muito importante no rearranjo das partículas retidas no interior do meio filtrante, o que levou o sistema a se estabilizar com o decorrer dos ciclos de filtração.

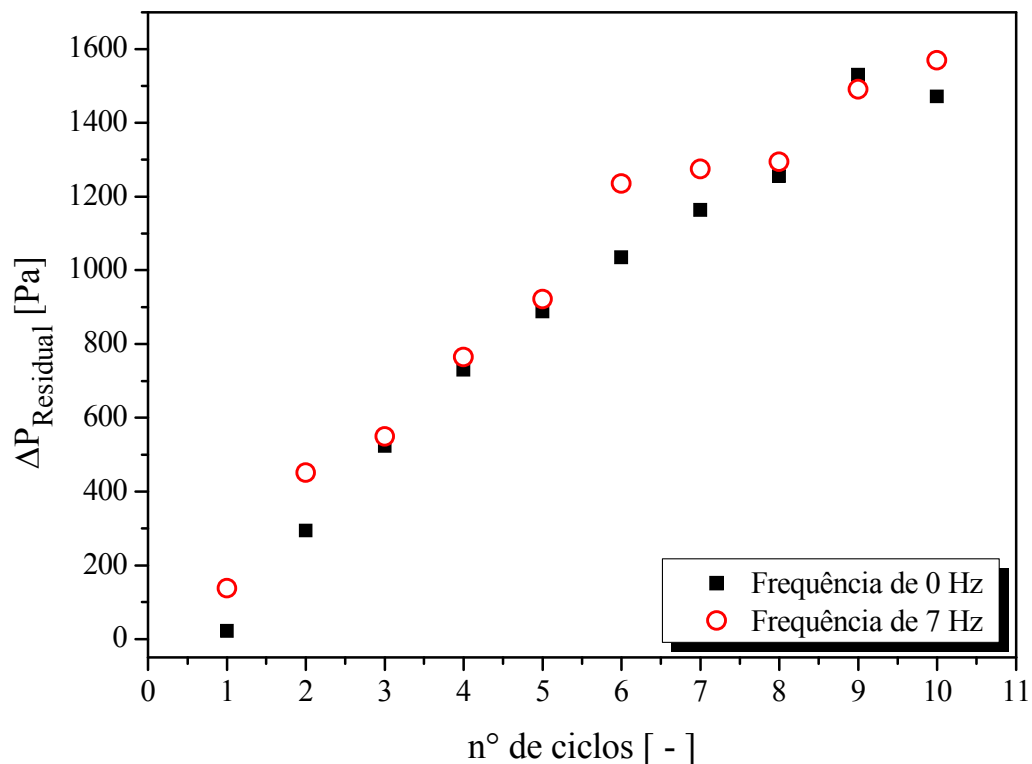


Figura 4.80 – Queda de pressão residual, para cada ciclo de filtração (f: 0 e 7 Hz).

4.6 Adimensional de Euler

Os efeitos da vibração mecânica nas necessidades energéticas do processo foram avaliados através do cálculo do Número de Euler (Eu). Como o Número de Euler relaciona a queda de pressão com a energia cinética, os cálculos foram realizados com base na Equação (2.43).

Nos testes com rocha fosfática moída, foram analisados os comportamentos dos sistemas sob influência de 7 Hz e 13 Hz, além do sistema estático. A Figura 4.81 apresenta o Número de Euler (Eu) em função da massa média de pó acumulada por unidade de área (W).

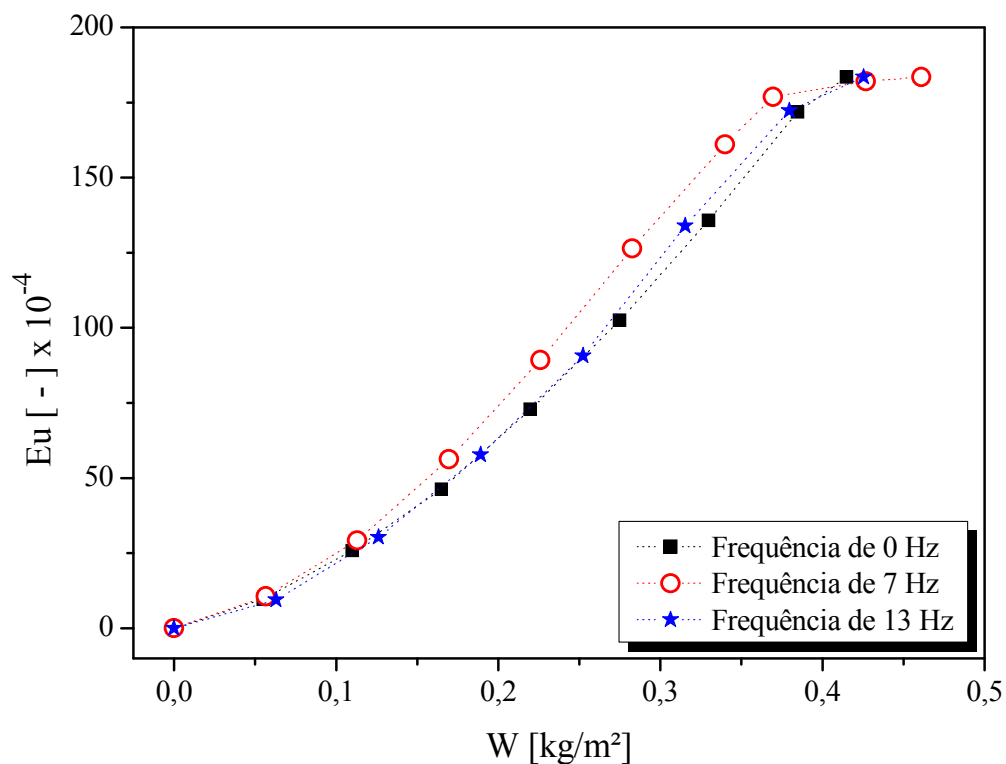


Figura 4.81 – Número de Euler (Eu) por massa acumulada por unidade de área (W); rocha moída.

Pôde-se constatar que, a partir do acúmulo de massa de 0,120 kg/m², o sistema submetido à vibração de 7 Hz começou a apresentar maiores valores para o adimensional Número de Euler que os outros sistemas, até que para o acúmulo de 0,270 kg/m² de massa sobre o meio filtrante, a diferença entre o sistema vibrando com 7 Hz de frequência e os outros é cerca de 23%, mantendo esse diferencial até o fim do ensaio, em relação ao sistema estático. O sistema vibrando com 13 Hz de frequência, a partir de 0,270 kg/m² e até o fim do ensaio, apresenta Números de Euler intermediários entre os outros dois sistemas, tendendo

para os valores do sistema estático, nos testes com a rocha moída. Pôde-se inferir que a frequência de 7 Hz aumenta as necessidades energéticas do processo de filtração, em relação ao sistema estático e ao sistema com vibração de 13 Hz.

A Figura 4.82 mostra o Número de Euler (Eu) em função da massa média de pó acumulada por unidade de área (W) para os experimentos realizados com rocha fosfática virgem, com frequências de 0 Hz e 7 Hz de vibração.

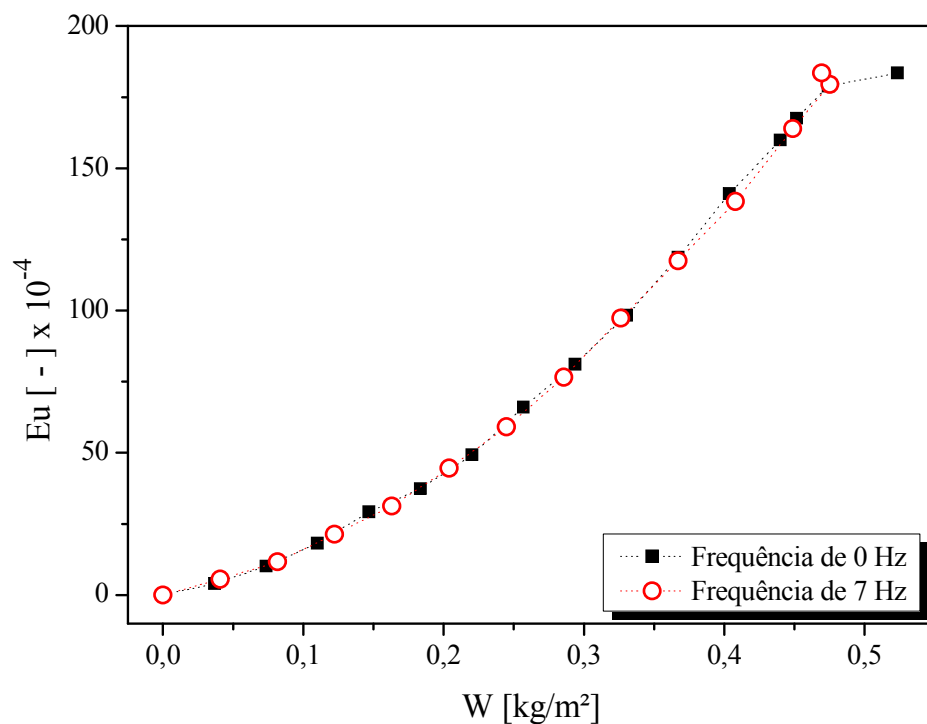


Figura 4.82 – Número de Euler (Eu) por massa acumulada por unidade de área (W); rocha virgem.

Nota-se, na Figura 4.82, que os Números de Euler calculados para o sistema submetido à vibração mecânica de 7 Hz foram os mesmos encontrados para o sistema estático. Claramente, pareceu não haver diferenças no comportamento entre os sistemas a 0 Hz e a 7 Hz, sendo que a necessidade energética de ambos os sistemas foi a mesma. Para o caso da filtração da rocha fosfática virgem, a vibração mecânica não exerceu nenhuma influência que alterasse as necessidades energéticas do sistema convencional (estático).

A Figura 4.83 apresenta os valores de Número de Euler (Eu), em função da massa média de pó acumulada por unidade de área (W) para os ensaios com polvilho doce, nas frequências de vibração de 0 e 7 Hz.

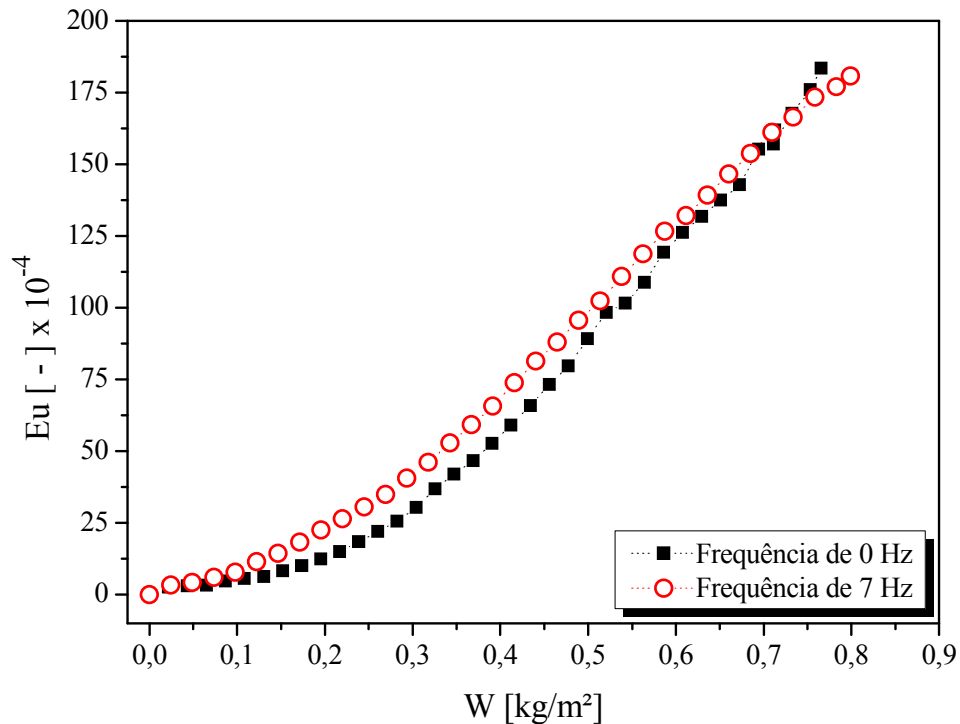


Figura 4.83 – Número de Euler (Eu) por massa acumulada por unidade de área (W); polvilho doce.

Na filtração do polvilho doce, observa-se, na Figura 4.83, que os testes submetidos à vibração de 7 Hz de frequência apresentaram maiores Números de Euler que para o sistema estático, desde o início do ensaio até o acúmulo médio de cerca de 0,620 kg/m² de massa sobre o meio filtrante. Essa diferença foi em torno de 65%. Nota-se que quando houve uma carga mássica média de 0,730 kg/m², o Número de Euler tende a diminuir, em relação ao sistema estático. Esse resultado sugeriu que, para a filtração de polvilho doce, a vibração mecânica desfavorece a economia com gastos energéticos, uma vez que, para a mesma massa acumulada por unidade de área, forneceu maiores Números de Euler que o sistema estático, na faixa de pressão avaliada (até 9806 Pa).

A comparação da filtração dos três materiais utilizados neste trabalho, em sistema vibrando e sistema estático, é exposta na Figura 4.84, a qual mostra a relação entre o Número de Euler e a carga mássica média sobre o meio filtrante, para cada sistema analisado nas Figuras 4.81 a 4.83. Pela análise da Figura 4.84 pôde-se inferir que, dentre os materiais pulverulentos utilizados nos testes, o polvilho doce foi o que proporcionou maior estabilidade energética ao sistema, uma vez que, em relação à rocha fosfática, para o mesmo Número de Euler, a filtração do polvilho apresentou maior acúmulo de massa sobre o meio filtrante.

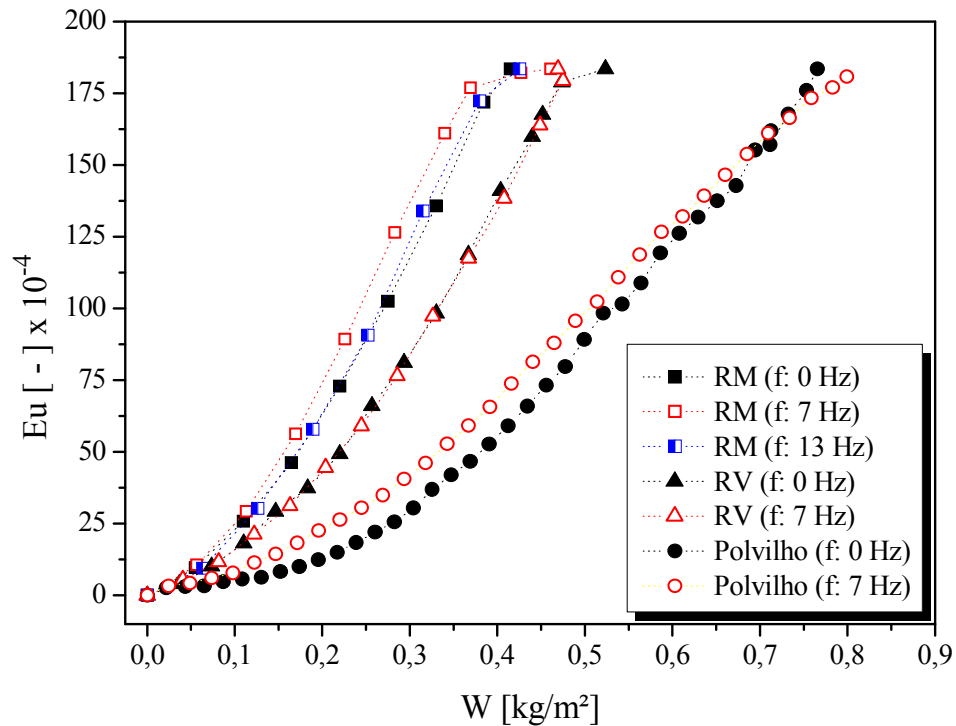


Figura 4.84 – Comparação do Número de Euler na filtração da rocha moída, rocha virgem e polvilho doce (f: 0 e 7 Hz).

A fim de se conhecer melhor a relação entre a estrutura das tortas de filtração dos diferentes materiais utilizados e o Número de Euler calculado para cada condição, a Figura 4.85 traz mais informações.

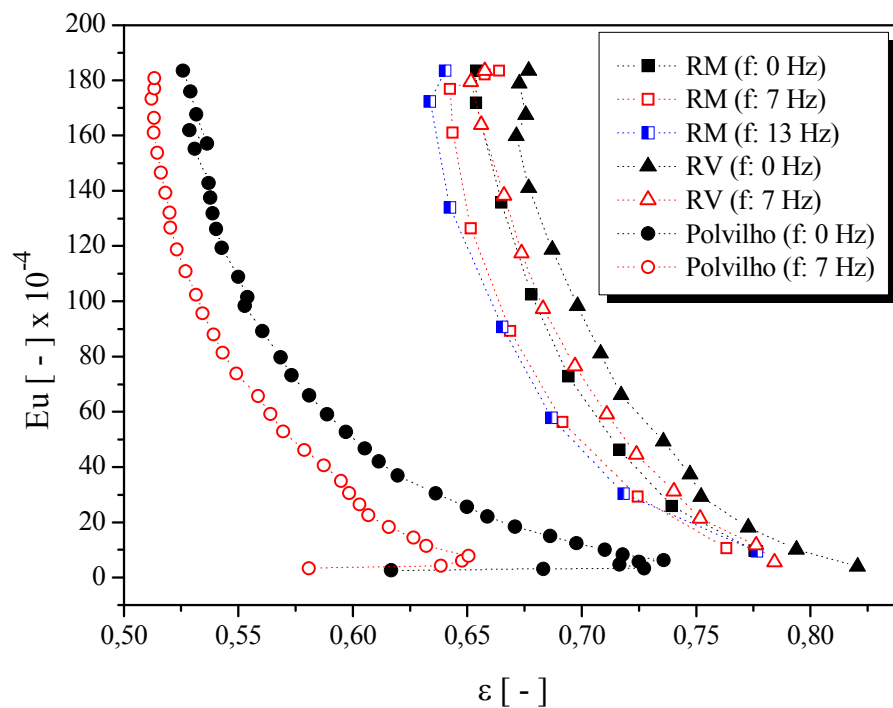


Figura 4.85 – Relação entre a estrutura da torta de filtração e o Número de Euler para: rocha moída, rocha virgem e polvilho doce.

Nota-se, pela Figura 4.85, que as tortas formadas na filtração do polvilho doce apresentam menor porosidade, a um dado Número de Euler, que as tortas de rocha fosfática.

Verifica-se, também para o polvilho doce, que, para porosidade da torta igual a 0,530 (proveniente de ambos os sistemas), o sistema sob vibração apresentou menor Número de Euler que o sistema estático, sendo essa diferença maior que 50%. Isso foi observado para o final do experimento.

4.7 Análise Geral da Vibração nos Sistemas Testados

As análises e discussões dos resultados apresentados neste capítulo conduzem, em suma, às seguintes considerações:

Rocha moída

- Nos testes com filtro de poliéster e queda de pressão máxima de 4903 Pa, tem-se, em relação às seguintes respostas:
 - ✓ curva de filtração: concavidade para cima no teste estático e nos testes com baixa (7 Hz), média (13 Hz) e alta (19 Hz) frequência de vibração;
 - ✓ porosidade das tortas (ε): ao final da filtração, apresentou valor médio de 0,72 nas frequências de 0, 7, 13 e 19 Hz;
 - ✓ ponto de colmatação: o sistema estático e o sistema com vibração de 19 Hz apresentam pontos de colmatação muito próximos (0,070 e 0,080 kg/m², respectivamente), valores mais altos que os pontos de colmatação para o sistema vibrando a 7 Hz e a 13 Hz (0,030 e 0,040 kg/m², respectivamente);
 - ✓ massa acumulada por unidade de área (W): para o sistema vibrando com 19 Hz, o valor encontrado foi muito próximo do sistema estático (0,280 e 0,300 kg/m², respectivamente); o sistema com vibração de 13 Hz obteve a maior massa acumulada (0,390 kg/m²), ao passo que o sistema vibrando a 7 Hz obteve a menor massa acumulada (0,250 kg/m²);
 - ✓ espessura da torta de filtração (L): na ordem crescente, apresentam valores de 0,39 mm, 0,44 mm, 0,46 mm e 0,48 mm, respectivamente para as frequências de 0, 19, 7 e 13 Hz;

- Nos testes com filtro de polipropileno e queda de pressão máxima de 4903 Pa, tem-se, em relação às seguintes respostas:
 - ✓ curva de filtração: concavidade para cima nos testes com vibração de 0, 7 e 13 Hz, se aproximando do comportamento linear para a frequência de 19 Hz;
 - ✓ porosidade das tortas (ε): ao final da filtração, apresentou, em média, o valor de 0,63 nas frequências de 0, 7, 13 e 19 Hz;
 - ✓ ponto de colmatação: foi o mesmo para os sistemas com frequências de vibração de 0, 7 e 13 Hz, tendo o valor de 0,030 kg/m²; para o sistema com 19 Hz de frequência, o ponto de colmatação se aproximou de zero;
 - ✓ massa acumulada por unidade de área (W): as frequências de 0 e 7 Hz, apresentaram valores bem próximos (0,180 e 0,190 kg/m², respectivamente); esses valores foram menores que os apresentados pelas frequências de 13 e 19 Hz (0,230 e 0,220 kg/m², respectivamente);
 - ✓ espessura da torta (L): valor de 0,19 mm para as tortas oriundas do sistema estático e do sistema vibrando a 19 Hz; apresentou valor mais baixo para a frequência de 7 Hz (0,15 mm) e, valor mais alto para a frequência de 13 Hz (0,18 mm);
- Nos testes com filtro de poliéster e queda de pressão máxima de 9806 Pa, tem-se, em relação às seguintes respostas:
 - ✓ curva de filtração: apresentaram o formato “S” para os testes realizados com frequências de 0, 7 e 13 Hz;
 - ✓ arraste do filtro (S): apresentou valores próximos para os testes com vibração de 0 e 7 Hz ($10,64 \times 10^4$ kg/(m²s) e $10,96 \times 10^4$ kg/(m²s), respectivamente) e um valor mais alto para o teste com 13 Hz de frequência ($11,70 \times 10^4$ kg/(m²s));
 - ✓ resistência específica da torta (k_2): cresceu à medida que a frequência aumenta, apresentando os valores de $2,62 \times 10^5$ s⁻¹, $2,88 \times 10^5$ s⁻¹ em $3,06 \times 10^5$ s⁻¹ para o sistema operando com vibração de 0, 7 e 13 Hz, respectivamente;
 - ✓ resistência específica do filtro (k_1): apresentou o menor valor para o sistema estático (2054 N·s/m³), valor intermediário para o sistema com

13 Hz de vibração ($2528 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$) e maior valor para o sistema vibrando com 7 Hz de frequência ($2911 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$);

- ✓ porosidade da torta de filtração (ε): apresentou valor muito próximo para os três sistemas, decrescendo, no entanto, o valor de 0,01 com o aumento da frequência, sendo 0,65, 0,64 e 0,63 para as frequências de 0, 7 e 13 Hz, respectivamente;
- ✓ ponto de colmatação: apresentou o mesmo valor para o sistema estático e para o sistema vibrando com frequência de 13 Hz ($0,050 \text{ kg}/\text{m}^2$); para o testes com 7 Hz, o valor foi menor: $0,030 \text{ kg}/\text{m}^2$;
- ✓ massa acumulada por unidade de área (W): apresentou o maior valor para o sistema estático ($0,41 \text{ kg}/\text{m}^2$); os sistemas sob vibração de 7 e 13 Hz apresentaram massas com valores muito próximos: $0,370 \text{ kg}/\text{m}^2$ e $0,380 \text{ kg}/\text{m}^2$;
- ✓ espessura da torta de filtração (L): a torta formada no sistema estático foi mais espessa, com 0,42 mm; em seguida, a torta proveniente do sistema vibrando a 7 Hz, com 0,36 mm; por último, a torta do sistema de 13 Hz de frequência, com espessura de 0,32 mm;
- ✓ força de adesão: foi maior na torta oriunda do sistema estático, adotando o valor de 2,23 N; em seguida, o valor intermediário de força de adesão é na torta do sistema com 13 Hz de vibração, sendo igual a 1,36 N; a menor força de adesão foi na torta do sistema com 7 Hz de vibração, cujo valor é 0,86 N.

Rocha Virgem

Nos testes com filtro de poliéster e queda de pressão máxima de 9806 Pa, tem-se, em relação às seguintes respostas:

- Curva de filtração: apresentou concavidade para cima no sistema estático e no sistema submetido à vibração;
- Arraste do filtro (S): foi menor no sistema estático, adotando um valor de $10,85 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; para o sistema submetido à vibração mecânica, esse valor é igual a $12,81 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$;

- Resistência específica da torta (k_2): foi igual a $2,28 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ para o sistema estático, valor menor que o calculado para o sistema submetido à vibração mecânica: $2,68 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$;
- Resistência específica do filtro (k_1): apresentou menor valor para o sistema estático ($2294 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$); para o sistema vibrando com frequência de 7 Hz, esse valor é de $2387 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$;
- Porosidade da torta de filtração (ε): foi maior na torta proveniente do sistema estático, adotando um valor de 0,67 contra 0,65 na torta do sistema que opera com vibração de 7 Hz;
- Ponto de colmatção: foi praticamente o mesmo nos dois sistemas, obtendo os valores de $0,100 \text{ kg}/\text{m}^2$ e $0,110 \text{ kg}/\text{m}^2$, respectivamente, para o sistema estático e para o sistema submetido à vibração mecânica;
- Massa acumulada sobre unidade de área (W): foi, essencialmente, a mesma em ambos os sistemas, apresentando o valor de $0,47 \text{ kg}/\text{m}^2$ para o sistema estático e $0,480 \text{ kg}/\text{m}^2$ para o sistema sob influência de vibração mecânica;
- Espessura da torta (L): foi maior para a torta proveniente do sistema sem vibração, chegando a um valor de 0,82 mm; no sistema sob influência de vibração, esse valor é de 0,66 mm;
- Força de adesão: apresenta quase que o mesmo valor para ambos os sistemas, sendo de 1,24 N para o sistema com vibração, 1,28 N para o sistema estático.

Polvilho Doce

Nos testes com filtro de poliéster e queda de pressão máxima de 9806 Pa, tem-se, em relação às seguintes respostas:

- Curva de filtração: apresentou concavidade para cima no sistema estático e no sistema submetido à vibração;
- Arraste do filtro (S): foi menor no sistema estático, adotando um valor de $53,07 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; para o sistema submetido à vibração mecânica, esse valor é igual a $61,31 \times 10^4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$;

- Resistência específica da torta (k_2): foi igual a $6,92 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ para o sistema estático, valor menor que o calculado para o sistema submetido à vibração mecânica: $7,64 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$;
- Resistência específica do filtro (k_1): apresentou menor valor para o sistema estático ($3668 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$); para o sistema vibrando com frequência de 7 Hz, esse valor é de $3916 \text{ N} \cdot \text{s}/\text{m}^3$;
- Porosidade da torta de filtração (ε): foi maior na torta proveniente do sistema estático, adotando um valor de 0,53 contra 0,51 na torta do sistema que opera com vibração de 7 Hz;
- Ponto de colmatação: foi maior no sistema estático, obtendo o valor de $0,210 \text{ kg}/\text{m}^2$; no sistema submetido à vibração esse valor é de $0,110 \text{ kg}/\text{m}^2$;
- Massa acumulada sobre unidade de área (W): foi, maior no sistema estático, apresentando o valor de $0,770 \text{ kg}/\text{m}^2$ contra $0,670 \text{ kg}/\text{m}^2$ no sistema sob influência de vibração mecânica;
- Espessura da torta (L): foi maior para a torta proveniente do sistema sem vibração, chegando a um valor de 3,02 mm; no sistema sob influência de vibração, esse valor é de 2,63 mm;
- Força de adesão: o menor valor da força de adesão foi na torta oriunda do sistema estático, sendo de 0,25 N; para o sistema sob influência da vibração mecânica, esse valor é de 0,63 N.

A Tabela 4.9 apresenta uma síntese dos valores encontrados para cada resposta, conforme descritos acima, para cada sistema experimentado.

O presente capítulo apresentou os principais resultados do trabalho, assim como as discussões concernentes aos mesmos.

Tabela 4.9 – Análise geral dos sistemas testados.

f [Hz]	Material particulado	Filtro	ΔP_{MAX} [cmH₂O]	Curva de Filtração	S [kg/(sm²)] $\times 10^{-4}$	k_2 [s⁻¹] $\times 10^{-5}$	k_I [N.s/m³]	ε [-]	P.C.* [kg/m²]	W [kg/m²]	L [mm]	F_c [N]
0	rocha moída	PP	50	Concavidade para cima	-	-		0,63	0,03	0,18	0,17	-
				Concavidade para cima	-	-		0,71	0,07	0,30	0,39	-
	rocha virgem polvilho doce	PE	100	Formato “S”	10,96	2,62	2054	0,65	0,05	0,41	0,42	2,23
				Concavidade para cima	10,85	2,28	2294	0,67	0,10	0,47	0,82	1,28
				Concavidade para cima	53,07	6,92	3668	0,53	0,21	0,77	3,02	0,25
7	rocha moída	PP	50	Concavidade para cima	-	-	-	0,62	0,03	0,19	0,15	-
				Concavidade para cima	-	-	-	0,72	0,03	0,25	0,46	-
	rocha virgem polvilho doce	PE	100	Formato “S”	10,64	2,88	2911	0,64	0,03	0,37	0,36	0,87
				Concavidade para cima	12,81	2,68	2387	0,65	0,11	0,48	0,66	1,24
				Concavidade para cima	61,31	7,64	3916	0,51	0,11	0,67	2,63	0,63
13	rocha moída	PP	50	Concavidade para cima	-	-	-	0,64	0,03	0,23	0,18	-
				Concavidade para cima	-	-		0,73	0,04	0,39	0,48	-
	rocha virgem polvilho doce	PE	100	Formato “S”	11,70	3,06	2528	0,63	0,05	0,38	0,32	1,36
				-	-	-	-	-	-	-	-	-
				-	-	-	-	-	-	-	-	-
19	rocha moída	PP	50	“Linear”	-	-	-	0,63	~ 0	0,22	0,17	-
				Concavidade para cima	-	-	-	0,72	0,08	0,28	0,44	-
	rocha virgem polvilho doce	PE	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
				-	-	-	-	-	-	-	-	-
				-	-	-	-	-	-	-	-	-

*Ponto de Colmatação

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões do estudo sobre a influência da vibração mecânica contínua concomitante ao processo convencional de filtração gás-sólido e, também, propõe sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

5.1.1 Respostas: W , k_2 , S , ε e L

- A vibração mecânica do sistema de filtração gás-sólido, na frequência de vibração de 7 Hz, provocou alterações significativas nas respostas estudadas: massa de pó acumulada por unidade de área (W), resistência específica da torta (k_2), arraste do filtro (S), porosidade (ε) e espessura da torta de filtração (L) para os testes realizados com a rocha fosfática moída e com o polvilho doce.
- A vibração mecânica aumentou a resistência específica da torta (k_2) e o arraste do filtro (S) para os testes realizados com a rocha fosfática moída, com a rocha fosfática virgem e com o polvilho doce, o que levou à formação de tortas menos porosas e menos espessas. Conclui-se, a partir dessas constatações, que a vibração mecânica aumentou a compactação da torta de filtração, aumentando as necessidades energéticas do processo.
- A vibração mecânica provocou aumento da resistência específica do filtro (k_1) nos testes de filtração de rocha fosfática moída e polvilho doce. Partículas menores (rocha moída) e partículas com o fator de forma dinâmico próximos da unidade (polvilho doce), sob frequência de vibração enquanto filtradas, acomodaram-se no filtro diminuindo sua permeabilidade, em relação ao processo com ausência de vibração.

5.1.2 Força de Adesão

- A frequência de vibração levou à formação de tortas com menores forças de adesão em relação ao meio filtrante, para as partículas com menores diâmetros.
- Para partículas com o formato mais próximo do esférico, a frequência de vibração provocou aumento nas forças de adesão entre a torta e o tecido.
- Partículas maiores e de formatos irregulares (rocha virgem) não foram tão sensíveis à influência da vibração mecânica no sistema, nas condições do estudo, pois, os sistemas vibrando e sem vibrar, apresentaram curvas de filtração semelhantes, formaram tortas com a mesma força de adesão em relação ao meio filtrante, influenciaram na mesma medida a resistência específica do filtro e demandaram ao sistema gastos energéticos semelhantes.
- A vibração mecânica, mesmo aumentando o atrito entre as partículas no sistema, não alterou, de forma significativa, o equilíbrio eletrostático do sistema, o que pôde ser comprovado nos testes com aterramento.
- Os modelos utilizados na literatura para a determinação da força de adesão entre a torta e o meio filtrante apresentaram boa aplicabilidade nos casos estudados.
- Os parâmetros “massa de pó acumulada por unidade de área” e “massa de pó retida por unidade de área”, principais indicadores da estrutura da torta no Método de Seville *et al.* (1989), revelaram-se tão importantes quanto o parâmetro da “porosidade” (indicador da estrutura da torta nos modelos de Rumpf (1962) e Kendall *et al.* (1986)) para apontar as diferenças estruturais existentes entre as tortas formadas no sistema convencional e no sistema sob influência de vibração mecânica.

5.1.3 Ciclos de Filtração

- A limpeza por ar reverso, nos testes com 10 ciclos de filtração para o sistema estático e para o sistema vibrando, mostrou-se como um fator determinante no arranjo das partículas entre as fibras do meio filtrante. No momento da limpeza, as partículas antes submetidas à vibração mecânica, tenderam a se acomodar como o fariam no sistema estático. A análise das curvas de filtração em todos os 10 ciclos permitiu concluir que a limpeza por ar reverso levou o filtro submetido à vibração mecânica a

atingir o comportamento do sistema estático, com aproximadamente 2 ciclos de defasagem.

5.1.4 Meio Filtrante, Teste Híbrido e Análise Geral do Sistema

- A vibração mecânica exerceu pouca influência na formação da torta sobre o meio filtrante com menores aberturas superficiais (polipropileno), nas condições experimentais estudadas.
- O sistema de vibração intermitente conduziu o processo a uma etapa de filtração interna mais longa, de acordo com o resultado do teste híbrido, o que permitiu concluir que a vibração provocava o aumento da profundidade de deposição das partículas.
- A vibração mecânica para a limpeza de filtros de manga é um processo antigo e eficiente. No entanto, os resultados experimentais obtidos no equipamento de teste em escala de laboratório não apresentaram destacamento da torta devido à vibração mecânica, ao contrário do que se esperava. Isso levou à conclusão de que houve grandes diferenças de funcionamento e comportamento de filtração nos filtros de manga em relação aos testadores de filtros planos.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Trocar os filtros em formato de disco por protótipos de filtros de mangas, para melhor avaliação da vibração ao longo da manga;
- Avaliação da estrutura da torta por microscopia;
- Avaliar a influência da vibração mecânica na profundidade de deposição das partículas no interior do meio filtrante;
- Realização de ensaios com diferentes umidades dos materiais;
- Experimentos com um número maior de ciclos de filtração e limpeza;
- Readaptação do aparato experimental, para que seja possível o teste de maiores frequências de vibração;
- Realização de testes com vibração mecânica horizontal, em relação ao escoamento do fluido;
- Desenvolvimento de um tratamento estatístico, com a obtenção de superfícies de resposta para os valores encontrados;
- Automatização da unidade experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACGIH – American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices for 1993-1994*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati, OH, 1993.
- AGUIAR, M. L. *Filtração de Ar em Filtros de Tecido*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSCar – São Carlos, 1991.
- AGUIAR, M. L. *Filtração de Gases em Filtros de Tecido: Deposição e Remoção da Camada de pó formada*. Tese de Doutorado. UFSCar – São Carlos, 1995.
- AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. *Fluid/Particle Separation Journal*, nº 5, p. 193, 1992.
- AGUIAR, M. L.; COURY, J.R. Cake Formation in Fabric Filtration of Gases, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 35, p. 3673-3679. 1996.
- AZEVEDO, S. G. R. *Estudo da Influência do Formato das Partículas na Operação de Filtração de gases*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSCar – São Carlos, 2009.
- 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. UFSCar – São Carlos, 2010.
- CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D. Evolutions of Efficiency and Pressure Drop of Filter Media During Clogging and Cleaning Cycles. *Powder Technology*. v. 128, p. 213–217, 2002.
- CEN – Comité Européen de Normalisation. *BS EN 481: Workplace Atmospheres: Size Fraction Definitions For Measurement of Airborne*. Brussels: BSI, 13 p. 1993.
- CERON, L. P.; EINLOFT, S.; SEFERIN, M. Avaliação do Processo de Secagem de Não-Tecidos de Pet na Fabricação de Palmilhas para Calçados, por Curvas Exotérmicas e Índice de Flexão. Renner Têxtil Ltda; Faculdade de Química; Revisão Técnica: Rafael Rodrigues Ramos, Porto Alegre, RS, 2010.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <http://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/ar/ar_indice_padroes.asp>. Acesso em: 15 set. 2014.
- CEZAR, A.L. R.; BARROS, P. M.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Estudo da Remoção de Tortas de Filtração de Gases para Pó Orgânico. *Anais do VIII COBEQ-IC*, Uberlândia, 2009.
- CHEN, Y-S.; HSIAU, S-S. Influence of Filtration Superficial Velocity on Cake Compression and Cake Formation. *Chemical Engineering and Processing*, v. 48, p. 988-996, 2009.

- CHEUNG, W. *Ph.D. Thesis*. University of Surrey. UK, 1989.
- CHOI, J.H.; HA, 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.
- COURY, J. R. *Electrostatic Effects in Granular Bed Filtration of Gases*. Tese de Doutorado, Cambridge Univ., Inglaterra, 1983.
- COURY, J. R. Filtração e Gases em Filtros Granulares. In: FREIRE, J. T.; GUBULIN, J. C. Tópicos Especiais de Sistemas Particulados, v. 2, 1986.
- DAVIES, C. N. Particle-Fluid Interaction. *Journal of Aerosol Science*, v. 10, p. 477-513, 1979.
- DENNIS, R. Collection as a Function of Particle Size, Shape and Density: Theory and Experience. *Journal of the Air Pollution Control Association*, p. 1156-1163 vol. 24 n° 12, 1974.
- DENNIS, R.; KLEMM, H. A. Recent Concepts Describing Fabric Filter System Behaviour. *Filtration and Separation*, 1982.
- DENNIS, R.; WILDER, J. Fabric Filter Cleaning Studies. U. S. Environmental Protection Agency Report, n° EPA-650/2-75-009, Washington, DC. 1975.
- DEUSCHLE, T.; JANOSKE, U.; PIESCHE, M. A CFD-Model Describing Filtration, Regeneration and Deposit Rearrangement Effects in Gas Filter Systems. *Chemical Engineering Journal*, v. 135, p. 49-55, 2008.
- DE RAVIN, M. *Ph.D. Thesis*, University of New South Wales, 1986.
- DITTLER, A.; FERER, M. V.; MATHUR, P.; DJURANOVIC, G. K.; SMITH, D. H. Patchy Cleaning of Rigid Gas Filters – Transient Regeneration Phenomena Comparison of Modeling to Experiment. *Powder Technology*, v. 124, p. 55-66, 2002.
- DITTLER, A.; KASPER, G. Simulation of Operational Behaviour of Patchily Regenerated, Rigid Gas Cleaning Filter Media. *Chemical Engineering and Processing*, v. 38, p. 321-327, 1999.
- DONOVAN, R. P. Fabric filtration for combustion sources. New York, Marcel Dekker. Inc. 1985.
- DUARTE FILHO, D. B. *Filtração de Gases em Leito Fixo Granular: Efeitos da Variação do Nível de Carga Eletrostática na Partícula*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP, 144 p. São Paulo, 1995.
- ENDO, Y.; ALONSO, M. Physical Meaning of Specific Cake Resistance and Effects of Cake Properties in Compressible Cake Filtration. *Filtration & Separation*, p. 43-46. 2001.

- 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.
- ENDO, Y.; NGAN, C. L.Y.; NANDIYANTO, A. B.D.; ISKANDAR, F.; OKUYAMA, K. Analysis of Fluid Permeation Through a Particle-Packed Layer Using an Electric Resistance Network as an Analogy. *Powder Technology*, v. 191 p. 39-46, 2009.
- ERGUN, S. Fluid Flow Through Packed Columns. *Chemical Engineering Progress*, v. 48, nº 2, p. 89-94, 1952.
- FARGNOLI, A. G. *Estudo da Compressibilidade de Tortas de Filtração de Gases em Filtros de Tecido*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSCar – São Carlos, SP, 2010.
- FAUSTINO, P. B. *Determinação Experimental da Força de Adesão entre Partículas e Meios Filtrantes Constituídos de Celulose*. Dissertação de Mestrado. UFSCar – São Carlos, SP, 2010.
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. Disponível em <<http://www.feam.br/qualidade-do-ar>>. Acesso em: 15 set. 2014.
- FELICETTI, M. A. *Investigação da Influência do Tamanho das Partículas de Materiais Pulverulentos sobre a Força de Adesão em Diferentes Substratos Aplicando a Técnica Centrífuga*. Tese de Doutorado. UFSCar – São Carlos, SP, 2008.
- FREITAS, N. L. *Estudo de Filtros Cerâmicos de Dupla Camada para Filtração de Aerossóis em Altas Temperaturas*. Tese de Doutorado. UFSCar – São Carlos, SP, 2003.
- FREITAS, N. L.; MANIERO, M. G.; COURY, J. R. Filtração de Aerossóis em Altas Temperaturas Utilizando Filtros Cerâmicos de Dupla Camada: Influência do Diâmetro de Partícula na Eficiência de Coleta. *Cerâmica* 50, p. 355-361, 2004.
- FUNDACENTRO. *Norma de Higiene Ocupacional NHO 08: Coleta de Material Particulado Sólido Suspenso no Ar de Ambientes de Trabalho*. Procedimento Técnico. Ministério do Trabalho e Emprego. São Paulo, 2009.
- FUNDO DE POPULAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Disponível em: <<http://www.unfpa.org.br/novo/index.php/populacao>>. Acesso em: 12 set. 2013.
- GINESTET, A.; PUGNET, D. Measurement of the Particle Emission of an Industrial Pulse-Jet Fabric Filter Following Filters Cleaning. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- GRAEF, A.; STENHOUSE, J. T. I.; WALSH, D. C. The Effect of Solid Aerosol on Prefilter Material Performance. *Journal of Aerosol Science*, v. 26, suppl 01, p. S741-S742, 1995.
- HAHNHEISER, H. *Dissertation*, Technische Hochschule für Chemie ‘Carl Schorlemmer’, Leuna-Merseburg, Germany, 1970.

- HAI-MING, F.; YAN-YAN, L.; YOU-FA, D. Simulating Permeability of 3-D Fibrous Media. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- HAMAKER, H. C. The London – Van der Waals Attraction Between Spherical Particles. *Physical IV*, nº 10, 15 p., 1937.
- HINDS, W. C. Aerosol technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. Wiley Interscience, 1999.
- HOLDICH, R. G. Fundamentals of Particles Technology. Midland Information Technology and Publishing, Loughborough, U.K. 173 p. 2002.
- IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/areas-tematicas-qa/programa-proconve>>. Acesso em: 17 set. 2013.
- INNOCENTINI, M. D. M. *Filtração de Gases a Altas Temperaturas*. Tese de Doutorado. UFSCar – São Carlos, SP, 1997.
- ISO 14000. Disponível em: <<http://www.suapesquisa.com/iso14000.htm>>. Acesso em: 16 set. 2013.
- 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, 1997.
- JEON, K.; JUNG, Y. Simulation Study on the Compression Behavior of Dust cakes. *Powder Technology*, v. 141. 11 p. 2004.
- JOUBERT, A.; LABORDE, J.C; BOUILLOUX, L.; CHAZELET, S.; THOMAS, D. Modelling the Pressure Drop Across Hepa Filters During Cake Filtration in the Presence of Humidity. *Chemical Engineering Journal*, v. 166 , p.616–623, 2011.
- KENDALL, K. ALFORD, N. McN.; BIRCHAL, J. D. The Strength of Green Bodies. *Br. Cerm. Proc.*, v. 37, 1986.
- KOCH, D.; SCHOLZ, K.; SEVILLE, J.P.K.; CLIFT, R.; Gas Cleaning at High Temperatures, in R. Clift and J.P.K. Seville (eds.). Blackie, Glasgow, 1993, p. 244.
- KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. Dust Cake Detachment from Gas Filters. *Powder Technology*, v. 141, p. 1-11, 1996.
- KULAIF, Y. Relatório Técnico 53: perfil do fosfato. Ministério de Minas e Energia. UNICAMP. Campinas – SP, 2009.
- KURTZ, O.; KASPER, G.; MEYER, J. Conclusions on the Operation Behaviour of Bag House Filters by Comparison of Flat Filter Discs and Filter Bags. *11th World Filtration Congress*, 2012.

- LEE, K. W. Particles Collection Mechanisms Pertinent to Granular Bed Filtration. *Fluid Filtration: Gas*, v. 1, p. 46-59, ASTM STP 975, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986.
- LEE, K. W.; LIU, B. Y. H. Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, *Aerosol Science and Technology*, v. 1, p. 147-166, 1982.
- LEITH, D., ALLEN, R. W. K. Dust Filtration by Fabric Filters, In: *Progress in Filtration and Separation*, vol. 4, R.J. Walkeman (ed.), Elsevier, Amsterdam, 1986.
- LIDÉN, G. Performance Parameters for Assessing the Acceptability of Aerosol Sampling Equipment. *Analyst*, Vol. 119, 1994.
- LOHRENGEL, B.; REINHARDT, A.; MAHESWARAN, N. Filtration Efficiency at High Filter Face Velocity. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- LORA, E. E. S. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energéticos, Industrial e de Transporte. 2ª edição – Rio de Janeiro: Interciência. 2002.
- MAHDI, F. M.; HOLDICH, R. G. Laboratory Cake Filtration Testing Using Constant Rate. *Chemical Engineering Research and Design*, 91 1145–1154, 2013.
- MALVERN INSTRUMENTS LIMITED. A Basic Guide to Particle Characterization, 2012.
- MARTINS, J. C. *Estudo da Deposição de Material Particulado no Meio Filtrante durante a Filtração Gás-Sólido*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSCar – São Carlos-SP, 2001.
- MATUGI, K.; MARTINATTI, I.; FARGNOLI, A. G.; AGUIAR, M. L. Estudo da Porosidade de Tortas de Filtração de Gases em Filtros de Tecidos. *Anais do VII COBEQ-IC*, Uberlândia, MG, 2009.
- MAUSCHITZ, G.; KOSCHUTNIG, W.; HÖFLINGER, W. The Influence of Filter Regeneration on the Internal Particle Rearrangement of Nonwovens for Cleanable Dust Filters. *16th International Congress of Chemical and Process Engineering*, 2004.
- MAUSCHITZ, G.; RUD, H.; HÖFLINGER, W. Particle Deposition in the Depth of Nonwoven Dust Filter Media and its Effect on Filter Clogging. In: *Proceedings Filtech*, Europa, Wiesbaden, Germany, 2007.
- MICHALSKI, J. ; JAKUBIAK, S.; ŻYWICKI, P.; JACKIEWICZ, A.; GRADOŃ, L.; KURZYDŁOWSKI, K. X-Ray Tomography of the Micro and Nano Fibers in a Non-Steady Filtration System. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- MOREIRA, F. L. *Estudo da Vibração Mecânica na Remoção de Tortas de Filtração em Filtros de Manga*. Dissertação de Mestrado. São Carlos – UFSCar, SP, 1998.
- MOREIRA, F. L.; SILVA NETO, O. G.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Filtração de Gases em Filtros de Manga: Relação da Queda de Pressão Residual com a Porcentagem de Torta Removida. *Anais do XXVII ENEMP*, p. 151-158, 1999.

- MORRIS, K.; ALLEN, R. W. K.; CLIFT, R. *Filtration and Separation*, 24, p. 41, 1987.
- MÜLLER, D.; RAMBO, C.R.; INNOCENTINI, M.D.M.; MOREIRA, E.A.; SILVA, G.M.C.; COURY, J. R.; HOTZA, D. Filtros Cerâmicos Fibrosos para Gases a Alta Temperatura. 17º CBECIMat – *Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, Foz do Iguaçu, PR, Brasil 2006
- NEGRINI, V. S.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Determinação da Porosidade de Tortas e Filtração de Gases. *Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*, v. 1, p. 193, Teresópolis, RJ, 1998.
- NÓBREGA, S. W.; COURY, J. R. Remoção de Torta de Filtração por Pulso Mecânico. In: XX Encontro sobre Escoamentos em Meios Porosos, São Carlos, 1992; *Anais do XX ENEMP*, v. 2. São Carlos-SP, 1992.
- NORMA VDI 3926 Parte I. Testing of Filter Media for Cleanable Filters Standart Test for the Evaluation of Cleanable Filter Media. Dusseldorf, Germany, 2003.
- NSK, Vibrações Mecânicas Aplicadas à Manutenção, Módulo 1, Brasil, 2004.
- 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. Uberlândia – UFU, 2011.
- POPOVICI, F.; GASPARIN, G. New Device for in Situ Testing of Filter Media in Pulse Jet Filter Plants Design and Operating Details – Start up Procedure and Experimental Results. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- PRONCOVE. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. PRONCOVE/PROMOT/IBAMA, 3 ed. Brasília. Ibama/Diqua, 584 p. 2011.
- QIAN, F.; CHEN, Z.; YE, Y.; ZHANG, X. Effect of the Bag Arrangement on the Dust Removal Performance of the Bag Filter. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- REMBOR, H. J.; KASPER, G. Fibrous Filter – Measurements of Spatial Distribution of Deposited Particle Mass, Pressure Drop and Filtration Efficiency. *III World Congress of Particle Technology*, 1996.
- RIEF, S.; GLATT, E.; WIEGMANN, A.; KABEL, M.; ANDRÄ, H. Deformation and the Change of Filtration Properties of Weaves - a Computational Approach. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- ROCHA, S. M. S. *Estudo da Influência da Velocidade e dos Ciclos de Filtração na Formação da Torta na Limpeza de Gases em Filtros de Mangas*. Tese de Doutorado. UFU – Uberlândia, MG, 2010.
- RODRIGUES, A. C. M. *Estudo da Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases em Filtros de Tecido de Polipropileno e de Algodão*. Dissertação de Mestrado. São Carlos – UFSCar, SP, 2004.

- RODRIGUES, K. B. *Filtração de Gases: Estudo da Deposição de Diferentes Tortas de Filtração em Diferentes Meios Filtrantes*. Tese de Doutorado. São Carlos – UFSCar, SP, 2006.
- RODRIGUES, M. V. *Análise do desempenho de um ciclone com mangas: efeito da permeabilidade do meio filtrante*. Dissertação de Mestrado, FEQUI/UFU, Uberlândia, MG, 2001.
- RUMPF, H. Particle Adhesion. In: *Sastra K.V.S. (Ed) Agglomeration 77*, American Institute of Mining. *Metallurgical and Petroleum Engineers*, New York, p. 97-129, 1977.
- RUMPF, H. The Strength of Granules and Agglomerates. In: KNEPPER, W. A., *Agglomeration Interscienc*, New York, p. 379-414, 1962.
- SALEEM, M.; KRAMMER, G.; M.; TAHIR, M. S. The Effect of Operating Conditions on Resistance Parameters of Filter Media and Limestone Dust Cake for Uniformly Loaded Needle Felts in a Pilot Scale Test Facility at Ambient Conditions, *Powder Technology*, 8 p., 2012.
- SANTOS, A. M. A. O Tamanho das Partículas de Poeira Suspensas no Ar dos Ambientes de Trabalho. Adaptação da Dissertação de Mestrado, UFMG. Ministério do Trabalho e Emprego, 96 p. 2001.
- SCHMIDT, M.; SCHÜTZ, S. Determination of Filter Efficiency With Optical Online Particle Measurement in Hot Gases Up to 450°C and in Chemically Aggressive Gas Components, *World Filtration Congress*, 2012.
- SCHUBERT, H. Principles of Agglomeration. *International Chemical Engineering*, v. 21, n° 3, p. 363-371, 1981.
- SEVILLE, J. *et al.* Patchy Cleaning of Rigid Gas Filters. *Chemical Engineering Science*, v. 52, 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.
- SHAABAN, S. Numerical Optimization and Experimental Investigation of the Aerodynamic Performance of a Three-Stage Gas-Solid Separator. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 89 p. 29–38, 2011.
- SHARMA, S. D.; MCLENNAN, K.; DOLAN, M.; ILYUSHECHKIN, A. Advantages and Possible Applications of a Novel Pulseless Filtration System. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- SIBANDA, V.; GREENWOOD, R. W.; SEVILLE, J. P. K. Particle Separation from Gases Using Cross-Flow Filtration. *Powder Technology*, v. 118, p. 193-202, 2001.
- SIEVERT, J.; LÖFFLER, F. *Filtration and Separation*, v. 24, p. 424, 1987.

- SILVA NETO, O. G. *Desempenho de um filtro de manga operando na remoção de partículas do ar*. Dissertação de Mestrado. São Carlos – UFSCar, 1996.
- SILVA NETO, O. G.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Filtração de Gás em Filtro de Manga: Estudo da Porosidade. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra*, v. 21, p. 187-195, 2002.
- STEFFENS, J. *Desempenho de Filtros Fibrosos Operando na Remoção de Partículas Nanométricas de Aerossóis*. Tese de Doutorado, DEQ/UFSCar, São Carlos, Brasil, 2007.
- STHECKINA, I. B.; FUCHS, N. S. Studies on Fibrous Aerosol – I Calculation of Difusional Deposition of Aerosols in Fibrous Filters. *Annals of Occupational Hygiene*, v. 9, p. 59-64, 1966.
- STÖCKLMAYER, C. H.; HÖFLINGER, H. Simulation of the Long-Term Behaviour of Regenerable Dust Filters. *Filtration and Separation*, v. 35, n° 4, p. 373-377, 1998.
- STRÖM, H.; SASIC, S.; ANDERSSON, B. A Novel Multiphase DNS Approach for Handling Solid Particles in a Rarefied Gas. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 37, p. 906-918, 2011.
- SVAROVISKY, L. Handbook of Powder Technology: *Solid-Gas Separation*, v. 3. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdã, Oxford, New York, 1981.
- TANABE, E. H. *Desempenho de Meios Filtrantes na Filtração de Gases a Altas Pressões*. Tese de Doutorado. São Carlos – UFSCar, SP, 2011.
- TANABE, E. H. *Estudo do Comportamento da Deposição das Partículas em Diferentes Meios Filtrantes*. Dissertação de Mestrado. São Carlos – UFSCar, SP, 2008.
- TANABE, E. H.; BARROS, P. M.; RODRIGUES, K. B.; AGUIAR, M. L. Experimental Investigation of Deposition and Removal of Particles During Gas Filtration with Various Fabric Filters, *Separation and Purification Technology*, v. 80, p. 187-195, 2011.
- TANABE, E.H.; INNOCENTINI, M.D.M; AGUIAR, M. L.; COURY, J.R. Performance of Polypropylene and Cellulose Filters in High Pressure Gas Filtration. *11th World Filtration Congress*, 2012.
- TANABE, E. H.; PASCHOAL, P. A.; AGUIAR, M. L. Tecidos que Removem Partículas. *Revista Meio Filtrante*. Ed. 30, Jan.-Fev. 2008.
- TANTHAPANICHAKOON, W.; CHARINPANITKUL, T.; JINTAWORN, W.; LAKSAMEEARUNOTAI, J.; AMORNKITBAMRUNG, M.; FUKUI, T.; YOSHIKAWA, M.; NAITO, M. CFD Investigation of High-Temperature Gas Filtration Using Twin Ceramic Candles. *Powder Technology*, v. 180, p. 245-252, 2008.

- TARDOS, G. I.; PFEFFER, R. Interceptional and Gravitational Deposition of Inertialess Particles on a Single Sphere in a Granular Bed. *AIChE Journal*, v. 26, n° 4, p. 698-701, 1980.
- THEODORE, L; BUONICORE, A. J. Air Pollution Control Equipment – *Particulates*, vol.1. CRC Press, Flórida, 1988.
- TIENI, E. F. *Filtração de Gases: Estudo do Fenômeno da Limpeza por Blocos*. Dissertação de Mestrado. São Carlos – UFSCar, 2005.
- TOGNETTI, E. R. *Influência das Condições Operacionais na Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSCar – São Carlos, 2007.
- TSAI, C.; CHENG, Y. Factors Influencing Pressure Drop through a Dust Cake During Filtration. *Aerosol Science and Technology*, 29: 4, p. 315-328, 1998.
- VINCENT, J. H., MARK, D. Entry Characteristics of Practical Workplace Aerosol Samplers in Relation to the ISO Recommendations. *Ann. Occup. Hyg.* Vol. 34, n° 3, pp. 249-262, 1990.
- WALSH, D. C. Recent Advances in the Understanding of Fibrous Filter Behaviour Under Solid Particle Load. *Filtration and Separation*, v. 33, n° 6, p. 501-506, 1996.
- WALSH, 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.
- WANG, H.; ZHAO, H.; GUO, Z.; HE, Y.; ZHENG, C. Lattice Boltzmann Method for Simulations of Gas-Particle Flows over a Backward-Facing Step. *Journal of Computational Physics*, 239, p. 57-71, 2013.
- YANG, C. Aerosol Filtration Application Using Fibrous Media - an Industrial Perspective. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 20, 9 p. 2012.
- ZHOO, Z. M.; TARDOS, G. I.; PFEFFER, R. Separation of Aerosol in Electrostatically Enhanced Fibrous Filter, *Processing of the Second World Congress on Particle Technology*, Kyoto, 1990.

Apêndice A

O Apêndice A apresenta, nas Tabelas A.1 a A.5, os parâmetros dos ajustes das curvas de filtração.

A Tabela A.1 apresenta os ajustes da queda de pressão ($y=\Delta P$) em função do tempo de filtração ($x=t$).

TABELA A.1 – Ajuste dos Testes Preliminares (gráfico da Figura 4.5).

Frequência [Hz]	0	5	6	7	12	13	14	18	19	20
Equação do ajuste	$y=ax^b$									
r^2	0,986	0,979	0,978	0,952	0,984	0,995	0,993	0,988	0,985	0,959
a	0,350	0,619	0,641	1,342	0,618	0,827	0,747	0,605	0,142	0,528
b	1,472	1,265	1,333	1,062	1,366	1,222	1,308	1,399	1,714	1,307

A Tabela A.2 apresenta os ajustes dos resultados apresentados na Seção (4.2), da queda de pressão ($y=\Delta P$) em função da massa de pó acumulada por unidade de área ($x=W$).

TABELA A.2 – Ajuste dos testes da Seção 4.2, para o filtro de Poliéster.

Frequência [Hz]	0	5	6	7	12	13	14	18	19	20
Equação do ajuste	$y=ax^b$									
r^2	0,990	0,953	0,994	0,980	0,986	0,989	0,987	0,960	0,992	0,941
a	32593	23472	26410	18862	27264	20994	29519	25187	37763	24282
b	1,506	1,214	1,400	1,180	1,373	1,226	1,289	1,319	1,621	1,426

A Tabela A.3 apresenta os ajustes dos resultados apresentados na Seção (4.2.1), da queda de pressão ($y=\Delta P$) em função da massa de pó acumulada por unidade de área ($x=W$).

TABELA A.3 – Ajuste dos testes da Seção 4.2.1, para o filtro de Polipropileno.

Frequência [Hz]	0	7	13	19
Equação do ajuste	$y^2=a+bx^{2,5}$	$y^2=a+bx^{2,5}$	$y^2=a+bx^{2,5}$	$y=a+be^x$
r^2	0,991	0,992	0,951	0,954
a	$8,17 \times 10^{-51}$	$8,72 \times 10^{-51}$	$9,53 \times 10^{-51}$	-18519,858
b	1661845900	1392377600	1063590200	18518,837

A Tabela A.4 apresenta os ajustes dos resultados apresentados na Seção (4.3), da queda de pressão ($y=\Delta P$) em função da massa de pó acumulada por unidade de área ($x=W$).

TABELA A.4 – Ajuste dos testes da Seção 4.3.

Frequência [Hz]	0	7	13	0	7	0	7
Material particulado	Rocha Fosfática Moída			Rocha Fosfática Virgem		Polvilho Doce	
Equação do ajuste	$y=a+bx^2(\ln x)$			$y^{0,5}=a+be^{-x}$	$y=a+bx^{1,5}$	$y^{0,5}=a+be^{-x}$	
r^2	0,977	0,991	0,977	0,963	0,992	0,994	0,959
a	-67,387	-52,207	-76,851	243	-138	191	171
b	-61579	-72687	-62376	-236	29118	-202	-162

A Tabela A.5 apresenta os ajustes dos resultados do Teste Híbrido, da queda de pressão ($y=\Delta P$) em função da massa de pó acumulada por unidade de área ($x=W$).

TABELA A.5 – Ajuste do Teste Híbrido, apresentado na Seção 4.3.1.1.

Frequência [Hz]	Teste Híbrido
Equação do ajuste	$y=a+bx/\ln x$
r^2	0,997
a	89,724
b	-22783

Anexo A

O Anexo A apresenta a carta psicrométrica utilizada para a leitura da umidade relativa dentro da câmara de alimentação.

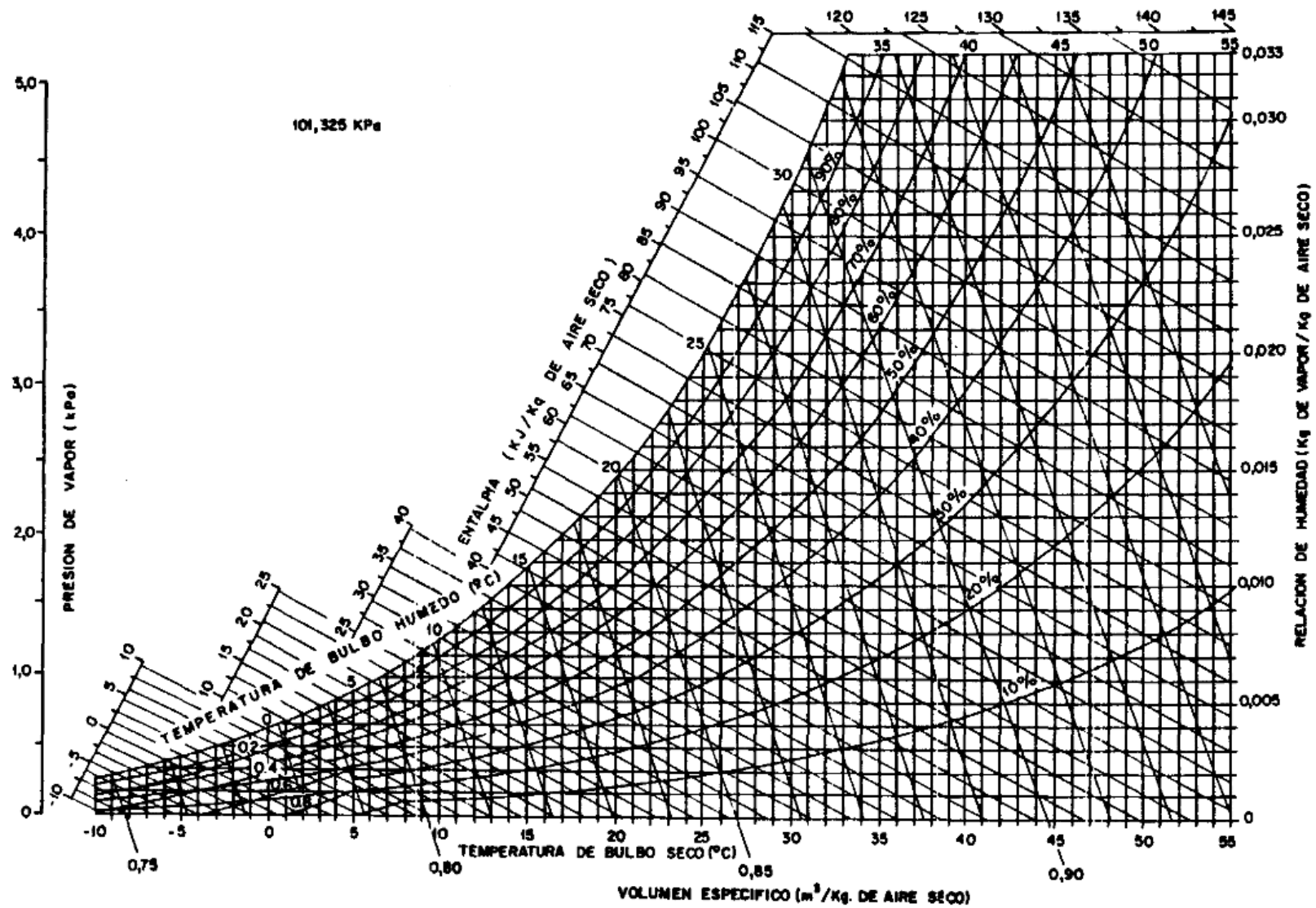


Figura A.1 – Carta Psicrométrica.