



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



**ESTUDO DA INTERAÇÃO FIBRA-PARTÍCULA EM PROCESSO DE
SEPARAÇÃO GÁS-SÓLIDO**

Uberlândia - MG

2019



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



**ESTUDO DA INTERAÇÃO FIBRA-PARTÍCULA EM PROCESSO DE
SEPARAÇÃO GÁS-SÓLIDO**

SUELLEN CRISTINE MEIRA

Orientadores:

Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca

Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno

Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química na área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia – MG

2019

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

M514e
2019 Meira, Suellen Cristine, 1993-
 Estudo da interação fibra-partícula em processo de separação gás-
 sólido [recurso eletrônico] / Suellen Cristine Meira. - 2019.

Orientador: Fábio de Oliveira Arouca.
Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.671>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. 2. Gases - Filtração. 3. Gases - Purificação.
4. Filtro manga. I. Arouca, Fábio de Oliveira, 1977- (Orient.). II.
Damasceno, João Jorge Ribeiro (Orient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br

**ATA**

Ata da defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO junto ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

DEFESA DE: Dissertação de Mestrado Acadêmico, 04/2019, PPGEQ

DATA: 14 de fevereiro de 2019 - 08:00

DISCENTE: 11712EQU011 - Suellen Cristine Meira

TÍTULO DO TRABALHO: Estudo da interação fibra-partícula em processos de separação gás-sólido

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Desenvolvimento de Processos Químicos

LINHA DE PESQUISA: Processos de Separação

PROJETO DE PESQUISA DE VINCULAÇÃO: Estudo da formação e remoção de tortas de filtração em filtros de tecido

Às 08 horas do dia 14 de fevereiro do ano de 2019, na sala 1K228 - *Campus* Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, reuniu-se a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Marcelo Maia Ribeiro Damasceno; Rubens Gedraite - PPGEQ/UFU; João Jorge Ribeiro Damasceno - PPGEQ/UFU, coorientador e Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca, apresentou a Comissão Examinadora e a Candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais.

Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata Aprovada e não estabeleceu novo título para o trabalho.

Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, legislação e regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos às 9 horas e 50 minutos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU - Orientador

João Jorge Ribeiro Damasceno - PPGEQ/UFU - Coorientador

Marcelo Maia Ribeiro Damasceno

Rubens Gedraite - PPGEQ/UFU



Documento assinado eletronicamente por **Fabio de Oliveira Arouca, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/02/2019, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Jorge Ribeiro Damasceno, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/02/2019, às 09:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Maia Ribeiro Damasceno, Usuário Externo**, em 14/02/2019, às 09:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Gedraite, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/02/2019, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0982862** e o código CRC **E92C0588**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a Deus por ter me dado forças para conseguir trilhar o caminho do mestrado e vencer esse desafio com muita fé e coragem durante todos os dias de minha vida.

Agradeço a minha família por todo o apoio durante esses dois anos em que dediquei minha vida exclusivamente pela pós, ao meu pai, Romero, por entender e não medir esforços por esse meu sonho, minha mãe, Fátima, por me acalmar e segurar as “pontas” quando eu pensei em desistir, aos meus irmãos Carlos e Alex por viverem meus sonhos e me apoiarem sempre. A minha avó, Josefa, por todo o carinho e oração, meu namorado, Emerson, por toda a paciência, apoio, ajuda nas edições do trabalho e carinho. Ao Huan, por ser meu “cãopanheiro” nas horas de estudo ficando sempre junto comigo. E aos demais familiares pelo apoio e torcida.

Agradeço as minhas amigas de Patos por entenderem a minha ausência (quase sempre) e torcerem muito por mim. A Letícia e Willian por terem me acolhido quando me mudei principalmente a situação delicada em que passava vocês são os melhores afilhados do mundo. As amigas que fiz no mestrado Amanda e Tamires por todo o apoio, reuniões e amizade vocês fizeram meu caminho mais leve. As minhas companheiras de apartamento, o melhor de Uberlândia e região, Isabela e Ana Caroline por todo o carinho, conversas, comidas e dietas, enfim por todo o convívio e entendimento, formamos uma família e vou levar para sempre vocês na vida. Os outros amigos que fiz em Uberlândia, obrigada pela convivência. As meninas do laboratório, Flávia, Nara e Thaís e aos meus alunos de iniciação científica pelas conversas e ajuda com a pesquisa.

Ao meu orientador Fábio Arouca e sua esposa Aline por todo o auxílio, paciência e ensinamentos passados, ao meu coorientador Damasceno por toda a ajuda e a FEQ- UFU pela oportunidade de fazer o mestrado nessa instituição de tamanho renome e qualidade.

Enfim agradeço a todas as pessoas que estiveram comigo nesses dois anos... Essa vitória é nossa!

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas, o mar seria menor se lhe faltasse uma gota. (Madre Teresa de Calcutá)

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	I
LISTA DE FIGURAS	II
NOMENCLATURAS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VI
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	3
2.1.2 DOENÇAS CAUSADAS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	4
2.2 FILTRAÇÃO GÁS SÓLIDO	5
2.3 FILTROS DE MANGA	6
2.4 FORMAÇÃO DA TORTA	7
2.5 QUEDA DE PRESSÃO NO FILTRO DE MANGA	8
2.6 POROSIDADE	10
2.6.1. Método Indireto ou teórico	10
2.7 MECANISMOS DE LIMPEZA	12
2.8 MATERIAL PARTICULADO	15
2.8.1 Rocha Fosfática	15
2.8.2 Polvilho	16
2.9 TIPOS DE TECIDOS	16
2.10 FORÇA DE ADESÃO	18
2.11 METODOLOGIA DE SEVILLE	18
2.12 OUTROS MÉTODOS DO CÁLCULO DA FORÇA DE ADESÃO	21
2.12.1 Método de Rumpf	21
2.12.2 Método de Kendall <i>et al.</i>	22
2.13 TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA	23

2.13.1	Trabalhos recentes com método microscopia de força atômica (AFM) e técnica centrífuga para o cálculo de força de adesão.....	25
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS		27
3.1	EQUIPAMENTOS	27
3.1.1	Unidade experimental.....	27
3.1.2	Sistema de Alimentação de Pó	29
3.1.3	Caixa de filtração.....	30
3.1.4	Soprador	31
3.2	MATERIAIS.....	32
3.2.1	Meio Filtrante e materiais particulados.....	32
3.2.2	Outros materiais utilizados.....	33
3.3	MÉTODOS	33
3.3.1	Velocidades de limpeza e filtração	33
3.3.2	Queda de pressão adotada no filtro	33
3.3.3	Porosidade	34
3.3.4	Método de Seville	34
3.3.5	Determinação da força de adesão	34
3.3.6	Metodologias de Rumpf e Kendall <i>et al.</i>	34
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES		35
4.1	CARACTERIZAÇÕES DOS MEIOS FILTRANTES.....	35
4.1.1	Polipropileno	35
4.1.2	Poliacrilato	37
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS	38
4.2.1	Rocha Fosfática	38
4.2.2	Polvilho Doce.....	41
4.3	CÁLCULO DA FORÇA DE ADESÃO POR SEVILLE <i>et al.</i> (1989)	42
4.3.1	Polipropileno e Rocha Fosfática	42
4.3.2	Poliacrilato e Rocha Fosfática.....	46

4.3.3 Polipropileno e Polvilho.....	49
4.3.4 Poliacrilato e Polvilho	52
4.4 OUTRAS METÓDOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE ADESÃO.....	55
4.4.1 Rumpf.....	55
4.4.2 Kendall <i>et al.</i>	56
4.5 COMPARAÇÕES ENTRE AS METODOLOGIAS.....	57
4.6 COMPARAÇÕES COM RESULTADOS DA BIBLIOGRAFIA	58
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
ANEXO A	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.2: Características do filtro de Polipropileno e poliacrilato.....	17
Tabela 4.1: Diâmetros médio e densidade de partícula para a rocha fosfática.....	39
Tabela 4.2: Diâmetros médio e densidade de partícula para o polvilho.....	41
Tabela 4.3: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	43
Tabela 4.4: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta..	44
Tabela 4.5: Características da torta calculadas.....	45
Tabela 4.6: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	46
Tabela 4.7: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta..	47
Tabela 4.8: Características calculadas da torta.....	48
Tabela 4.9: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	49
Tabela 4.10: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta.....	50
Tabela 4.11: Características calculadas da torta.....	51
Tabela 4.12: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	52
Tabela 4.13: Coeficientes do gráfico: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta.....	53
Tabela 4.14: Características calculadas da torta.....	54
Tabela 4.15: Força de adesão dada pela Equação de Rumpf.....	56
Tabela 4.16: Força de adesão dada pela Equação de Kendall <i>et al.</i>	56
Tabela 4.17: Força de adesão por Seville, Rumpf, Kendall <i>et al.</i>	57
Tabela 4.18: Distância de separação efetiva.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de formação da torta.....	6
Figura 2.2: Filtração de profundidade superficial.....	8
Figura 2.3: Demonstração da primeira e segunda etapa propostas por Seville <i>et al.</i> (1989).....	19
Figura 2.4: Demonstração da terceira etapa propostas por Seville <i>et al.</i> (1989).....	20
Figura 3.1: Esquema geral da unidade experimental.....	28
Figura 3.2: Esquema do sistema de alimentação.....	29
Figura 3.3: Caixa de filtração.....	30
Figura 3.4: Conectores e tubos em U.....	30
Figura 3.5: Soprador.....	31
Figura 3.6: Soprador	32
Figura 4.1: Estrutura superficial do tecido polipropileno – 200 μm	36
Figura 4.2: Estrutura superficial do tecido polipropileno – 20 μm	36
Figura 4.3: Estrutura superficial do tecido poliacrilato – 200 μm	37
Figura 4.4: Estrutura superficial do tecido poliacrilato – 20 μm	38
Figura 4.5: Estrutura da rocha fosfática – 20 μm	40
Figura 4.6: Estrutura da rocha fosfática – 2 μm	40
Figura 4.7: Estrutura do polvilho – 2 μm	41
Figura 4.8: Estrutura do polvilho – 20 μm	42
Figura 4.9: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	43
Figura 4.10: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta.....	44
Figura 4.11: Velocidade de limpeza (V_c) e Variação de pressão na limpeza (ΔP_L).....	45
Figura 4.12: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	46
Figura 4.13: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta.....	47
Figura 4.14: V_c x ΔP_L	48
Figura 4.15: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	49
Figura 4.16: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta.....	50
Figura 4.17: V_c x ΔP_L	51
Figura 4.18: Fração de massa retida x Velocidade de Limpeza.....	52
Figura 4.19: Fração de massa retida x Variação de Pressão na torta.....	53
Figura 4.20 : V_c x ΔP_L	54

NOMENCLATURA

ΔP – Queda de Pressão [$ML^{-1}T^{-2}$]

L - Espessura do filtro [L]

μ – Viscosidade do fluido [$ML^{-1}T^{-1}$]

β_r - Coeficiente de resistência inercial [-]

ρ_g – Densidade do gás [ML^{-3}]

α_r – Coeficiente de resistência viscosa [-]

U_o – Velocidade superficial do gás [MT^{-1}]

ΔP_L – Queda de pressão na torta na limpeza [$ML^{-1}T^{-2}$]

L – espessura da torta de filtração [L]

μ – viscosidade do gás de arraste [$ML^{-1}T^{-1}$]

ε - porosidade da torta [-]

d_p - diâmetro médio das partículas [L]

ρ_g - Massa específica [ML^{-3}]

v_f - velocidade superficial do gás [LT^{-1}]

Q - consiste na vazão mássica [MT^{-1}]

ρ_p - a densidade da partícula [ML^{-3}]

K_1 - a resistência específica do meio filtrante [$ML^{-2}T^{-1}$]

K_2 - a resistência específica da torta [T^{-1}]

ΔP_{CL} - queda de pressão na torta [$ML^{-1}T^{-2}$]

γ - fração mássica retida [-]

W_R - massa de pó após a limpeza [ML^{-2}]

W – massa de pó após a filtração [ML^{-2}]

V_C - velocidade de limpeza [LT^{-1}]

d_1 e d_2 - diâmetros das esferas [L]

a - distância entre as duas superfícies/ efetiva [L]

H - constante de Hamaker [ML^2T^{-2}]

F - força média que atua nos pontos de contato [MLT^{-2}]

n - número médio de contatos partícula -partícula por unidade de área

M - Massa de Partículas [M]

t - tempo [T]

σ^* - tensão normal [$ML^{-1}T^{-2}$]

σ_{R-R} - tensão de ruptura do aglomerado dada por Rumpf [$ML^{-1}T^{-2}$]

NOMENCLATURA

IV

σ_{R-K}^* - tensão de ruptura do aglomerado por Kendall [$ML^{-1}T^{-2}$]

σ_R - tensão de remoção da torta [$ML^{-1}T^{-2}$]

F_c - força de adesão entre as partículas [MLT^{-2}]

A - área do filtro [L^2]

RESUMO

A crescente preocupação com a poluição do ar, recentemente agravada pelo crescimento industrial, fez com que o desenvolvimento de técnicas e equipamentos para a purificação e filtração de gases se tornasse essencial para o desenvolvimento tecnológico sustentável. Além do mérito ambiental, aperfeiçoar as técnicas de filtração para diversos tipos de partículas emitidas é importante também para as indústrias que pretendem recuperar tais partículas, já que capturar este material particulado presente no gás pode agregar valor ao subproduto do processo, aumentando o lucro da indústria. A filtração é uma das técnicas mais usuais na captura de material particulado, já que a mesma se utiliza de equipamentos com grande potencial e eficiência, sendo os mesmos pouco vulneráveis às mudanças nos fatores operacionais. Um dos equipamentos mais utilizados na filtração gás-sólido é o filtro manga. O uso de tais filtros busca minimizar a emissão de partículas para a atmosfera, além de recuperar uma significativa quantidade do pó que seria inicialmente desprezado, quando o mesmo possui interesse econômico por parte da indústria. Esses filtros são amplamente aplicados pela sua alta eficiência no método de retenção do material particulado no tecido e vantagem econômica (baixo custo de implantação). O processo geral de filtração se dá através da formação de tortas as quais auxiliam no papel de retenção de partículas. Utilizando tecidos de poliacrilato e polipropileno fez-se a filtração e formação de torta com material pulverulento rocha fosfática moída e polvilho doce da marca Amafil. Trabalhando com fluxo de ar reverso e adotando a velocidade superficial de filtração de 10 cm/s, variação de pressão na torta de 20 cmH₂O e velocidades de limpeza de 7, 11 e 15,5 cm/s, para o cálculo de força de adesão foram utilizados os métodos de Kendall, Rumpf e Seville. Através dos experimentos foi possível concluir que os três métodos de cálculo de força de adesão forneceram valores consistentes com a realidade, dentro de suas limitações, devido a dificuldade em quantificar a distância de separação efetiva (a) para o método de Rumpf. Através de Seville obteve-se a maior força de adesão para os quatro testes. A força de adesão e a foram maiores para os filtros de polipropileno e rocha fosfática. Os cálculos da distância efetiva de separação utilizando a Equação de Rumpf estão dentro da faixa de 4.10^{-10} e 4.10^{-8} m proposta por Schubert (1981), comprovando que a tensão de remoção obtida experimentalmente foi satisfatória.

Palavras-chave: força de adesão, filtro de manga, filtração, gás-sólido.

ABSTRACT

The growing concern about air pollution, recently aggravated by industrial growth, has led to the development of techniques and equipment for gas purification and filtration to become essential for sustainable technological development. In addition to environmental merit, perfecting filtration techniques for various types of emitted particles is important also for industries wishing to recover such particles, since capturing this powder in the gas can add value to the by-product of the process, increasing the total industry profits. Filtration is one of the most common techniques for capturing particulate matter, since it uses equipment with great potential, efficiency and little vulnerability to changes in operating factors. One of the most used equipment in gas-solid filtration is the sleeve filter. The use of such filters seeks to minimize the emission of particles into the atmosphere, in addition to recovering a significant amount of the dust that would initially be neglected, when the same has an economic interest on the part of the industry. These filters are widely applied for their high efficiency in the method of retention of the particulate material in the fabric and economical advantage (low implantation cost). The general filtration process occurs through the formation of pies and these assist in the role of particle retention. Using polyacrylate and polypropylene fabrics the filtration and formation of pie with ground phosphate rock powder and sweet powder Amafil. Working with reverse airflow and adopting the filtration surface velocity of 10 cm / s, pressure variation in the pie of 20 cmH₂O and cleaning speeds of 7, 11 and 15.5 cm / s, for the calculation of adhesion strength the methods of Kendall, Rumpf and Seville were used. Through the experiments it was possible to conclude that the three methods of calculating adhesion strength remitted values consistent with reality, within their limitations, due to the difficulty in quantifying the effective separation distance (a) for the Rumpf method. Through Seville it was obtained the greatest adhesion force for the four tests. The adhesion strength and a were higher for the polypropylene and phosphate rock filters. The calculations of the effective separation distance using the Rumpf equation are within the range of $4 \cdot 10^{-10}$ and $4 \cdot 10^{-8}$ m proposed by Schubert (1981), proving that the removal voltage obtained experimentally was satisfactory.

Key words: adhesion strength, sleeve filter, filtration, gas-solid.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O aumento populacional crescente 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. A poluição do ar, por exemplo, através de suspensões de materiais particulados com diâmetros inferiores a 10 µm, os chamados aerossóis de partículas respiráveis ou inaláveis, é extremamente prejudicial à saúde humana, sendo responsável por diversos tipos de doenças crônicas alérgicas e respiratórias. Tais suspensões são produzidas principalmente pelo setor industrial e pelo funcionamento de motores à combustão.

O excesso de material particulado na atmosfera pode prejudicar a saúde pública, principalmente no que se diz respeito às partículas inaláveis, uma vez que essas partículas podem ser inaladas pelo sistema respiratório e retidas no pulmão, além de em algumas vezes possuírem propriedades tóxicas, cancerígenas e causarem alergias. (DERISIO, 1992).

Com o objetivo de reduzir ou até mesmo eliminar as emissões de poluentes para meio ambiente normas ambientais foram estabelecidas. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) definiram legalmente padrões nacionais de limite máximo para a concentração de poluentes na atmosfera.

De forma a se adequar à legislação vigente, as indústrias devem utilizar sistemas para promover a limpeza de ar, antes de seu descarte para a atmosfera. Então se deve fazer a utilização de equipamentos de controle, tais como câmaras gravitacionais ou inerciais, precipitadores eletrostáticos, lavadores de gases, ciclones e filtração de gases por filtros de mangas como forma de minimizarem a emissão de partículas no ar e de atenderem à legislação, bem como necessários para a recuperação de materiais descartados na corrente gasosa, maximizando a redução dos custos (SOUZA, et al., 2012). Um dos sistemas mais comuns utilizados para este fim são os filtros de tecidos, uma vez que apresentam altas eficiências de coleta para partículas inaláveis e baixos custos de operação e manutenção. O princípio de funcionamento destes filtros é a separação mecânica das partículas pelo escoamento do gás de arraste através do tecido e do meio poroso formado pelas partículas depositadas sobre o mesmo, denominada torta de filtração (AROUCA, 2014).

Neste trabalho se destacam os filtros de manga e o estudo da força de adesão, que consiste na interação fibra partícula, ou seja, do material pulverulento e o filtro de tecido. No caso desses filtros, as partículas ficam retidas na superfície do tecido que, de tempos em

tempos, necessitam de sua retirada para que não haja a colmatação do filtro que consequentemente diminui a eficiência do sistema de ventilação. Os mecanismos de coleta envolvidos neste processo são principalmente o impacto direta inercial, difusional, a atração eletrostática e a força gravitacional (SCHIRMER *et al.*, 2008).

A força de adesão é um parâmetro muito importante quando se discute a remoção de tortas. É muito utilizada para a sugestão das melhores condições operacionais para uma remoção mais eficiente. Esta força é definida pela atração entre dois corpos sólidos, esta se dá devido às forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância. Então se conclui a necessidade de aplicação de uma força maior que aquela que une a torta ao tecido com o intuito de maior eficiência no processo de limpeza após a filtração de gases. Por isso a importância do estudo e entendimento da força de adesão, seja pelo mérito ambiental ou econômico industrial.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo central estudar a força de adesão filtro-partícula em filtros de manga através de testes de filtração gás-sólido.

Com o intuito de alavancar o objetivo geral foram feitas caracterizações dos materiais fibrosos e particulados utilizados nessa pesquisa, aperfeiçoamento do conhecimento da interação entre partícula-fibra através de medidas da força de adesão em diferentes tipos de materiais pulverulentos e diferentes meios filtrantes, além da avaliação da correlação da estimativa da força de adesão existente na literatura.

A estrutura do trabalho está distribuída da seguinte forma:

Capítulo 2: É composto pela revisão bibliográfica que engloba estudos e explicações acerca dos temas centrais abordados neste trabalho com embasamento em outros trabalhos e pesquisas.

Capítulo 3: Apresenta-se neste capítulo a descrição dos equipamentos e materiais utilizados em todos os testes realizados e a metodologia para obtenção dos dados experimentais.

Capítulo 4: Apontam e discutem os resultados obtidos experimentalmente, comparação e relações com a literatura acerca do tema gás-particulado.

Capítulo 5: apresenta as principais conclusões obtidas neste trabalho, assim como sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as publicações mais representativas no que diz respeito à contribuição ao estudo da força de adesão e a evolução do tema ao longo dos anos.

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Segundo Cançado (2006) a poluição atmosférica pode ser definida como substâncias estranhas presentes na atmosfera, que podem vir de processos naturais ou até mesmo de atividades humanas tendo a possibilidade de acarretar problemas direta ou indiretamente na vida, saúde e bem estar de todos os seres vivos.

É de senso comum que o planeta passa por uma crise ambiental. De acordo com Lora (2002), estão entre as principais causas desta situação o considerável crescimento populacional, o processo de industrialização e urbanização e a elevação do consumo de energia. Saldiva (2002) define como as principais fontes de emissão da contaminação do ar urbano: as indústrias e os veículos automotores.

O crescimento da população relaciona-se principalmente ao aumento correspondente da utilização da energia e recursos naturais para satisfazer sua necessidade. Lora (2002) destaca o processo de industrialização e urbanização como outro claro exemplo de influência na poluição ambiental, refletida na emissão de gases poluentes por empresas e veículos, problemas de saneamento, geração de resíduos sólidos, dentre outras ações.

Poluentes gerados no ambiente urbano podem primeiro acumular no ar e depois serem transportados para superfícies de solo através de deposição atmosférica (WANG, 2016). A deposição atmosférica pode ocorrer como deposição seca e úmida. Nesse contexto, a poluição atmosférica também pode ser um contribuinte significativo de degradação da qualidade das águas pluviais (LIU, 2018).

Para controlar a qualidade do ar, minimizando a quantidade de aerossóis lançados à atmosfera, estão em vigência normas de controle ambiental que devem ser seguidas por todos os setores industriais. De acordo com a resolução nº 3 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), de 28 de junho de 1990, o limite máximo estabelecido para emissão de partículas inaláveis (padrão primário) é de 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e o limite desejável (padrão secundário) é inferior a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar. De forma a se adequar à legislação vigente, as indústrias devem utilizar sistemas para promover a limpeza de ar, antes de seu descarte para a atmosfera.

Outro questionamento importante quanto à poluição é o quanto a mesma é prejudicial à saúde, mesmo quando seus níveis se encontram aquém do que determina a legislação vigente. As faixas etárias mais afetadas são as crianças e os idosos, grupos bastante suscetíveis aos efeitos da poluição (BAKONYI, 2004).

2.1.2 DOENÇAS CAUSADAS PELA POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

As manifestações biológicas no sistema respiratório são causadas pelos efeitos de poluentes gasosos e materiais particulados inaláveis, que em sua maioria, são gerados a partir da queima de combustíveis fósseis. Essas manifestações têm sido medidas através de aumentos nos atendimentos de pronto-socorro, internações hospitalares e mortalidade ocorrendo especialmente, em crianças e idosos. (BRAGA, 2007).

Conforme Santos (2001) inúmeras doenças podem ser originárias no trato respiratório vindas dos poluentes no ar. Nas vias aéreas superiores (nariz, boca, nasofaringe, orofaringe, laringofaringe e faringe) podem ser relacionadas as doenças de irritação do septo nasal, faringe e laringe, além de câncer na faringe e laringe. Na região Traqueobronqueal (traqueia, brônquios, bronquíolos) pode-se ocorrer broncoconstrição, bronquite crônica, câncer bronquial. A terceira e última região é a de trocas de gases (bronquíolos respiratórios, ducto alveolares, sacos alveolares e alvéolos) em que se destacam doenças como pneumoconioses, enfisema, alveolite, câncer pulmonar.

Materiais particulados finos (<2,5 µm) encontrados em ar agregado à poluição é o fator de risco ambiental mais importante que contribui para a mortalidade e incapacidade cardiovascular global. Exposições à poluição atmosférica à longo prazo, ou seja por vários anos, aumentam o desenvolvimento de condições cardiometabólicas, por exemplo: hipertensão e diabetes mellitus (RAJAGOPALAN, 2018).

Na história existem diversos episódios de excesso de poluição que causaram óbitos. Em 1930, no Vale de Meuse, Bélgica devido a uma grande concentração de indústrias, principalmente químicas e centrais de produção de energia elétrica e minas de carvão entre o dia 1º e 5 de dezembro daquele ano houve condições meteorológicas desfavoráveis, como por exemplo, a ausência de ventos o que impediu a dispersão dos poluentes, que permaneceram estacionados sobre a região. Isso acarretou um demasiado aumento das doenças respiratórias e 60 mortes em até dois dias após esse episódio (BRAGA, 2001).

Outro caso de poluição atmosférica ocorreu em outubro de 1948 na cidade de Donora, Pensilvânia. Os produtos da combustão das indústrias locais causaram inversão térmica, fazendo a conta de 20 mortes na comunidade que tinha 14 mil habitantes. Mais um caso bastante conhecido e assustador aconteceu no inverno de Londres em 1952 onde houve inversão térmica e uma nuvem com material particulado e enxofre, estacionou sobre a cidade por três dias, levando a um aumento de quatro mil mortes em relação a média de óbitos em períodos semelhantes (BRAGA, 2001).

Com todos esses trágicos episódios e a quantidade de doenças ocasionadas pela poluição atmosférica os pesquisadores tiveram que se atentar para a necessidade de controlar a emissão de poluentes no ar e uma das soluções seria a filtração.

2.2 FILTRAÇÃO GÁS-SÓLIDO

A filtração se dá pela separação física de um fluido transportado e componentes particulados sólidos ou gasosos; sendo necessário existir velocidade relativa entre a partícula e o corpo de coleta. A captura da partícula ocorre quando há a colisão e consequente aderência da partícula ao corpo de coleta, não se tratando, portanto, de simples peneiramento, na qual apenas partículas de tamanho maior que o tamanho dos poros do meio filtrante ficam nele retidas (RICCO JUNIOR, 2007).

Com a captura de partículas no interior do meio filtrante ocorre a operação de filtração, onde o material pulverulento passa a ser depositado na superfície do meio filtrante, formando a torta de filtração que se torna o principal meio filtrante da operação (AROUCA, 2014). Na figura 2.1 é retratada a formação da torta de filtração.

A filtração é utilizada em muitos ramos da indústria para obter um gás puro para várias aplicações, bem como em processos de proteção ambiental para remover impurezas sólidas ou líquidas de um gás esgotado (GAC, 2016).

Existem inúmeros fatores que podem interferir na filtração e na formação da torta. Dentre estes podem ser citados: velocidade de filtração, densidade e viscosidade do gás, espessura da torta, além do tipo de tecido de filtração e o material particulado utilizado, os mesmos podem influenciar diretamente na eficiência e viabilidade econômica deste método de limpeza de gases (RODRIGUES, 2004; NUNES, 2017).

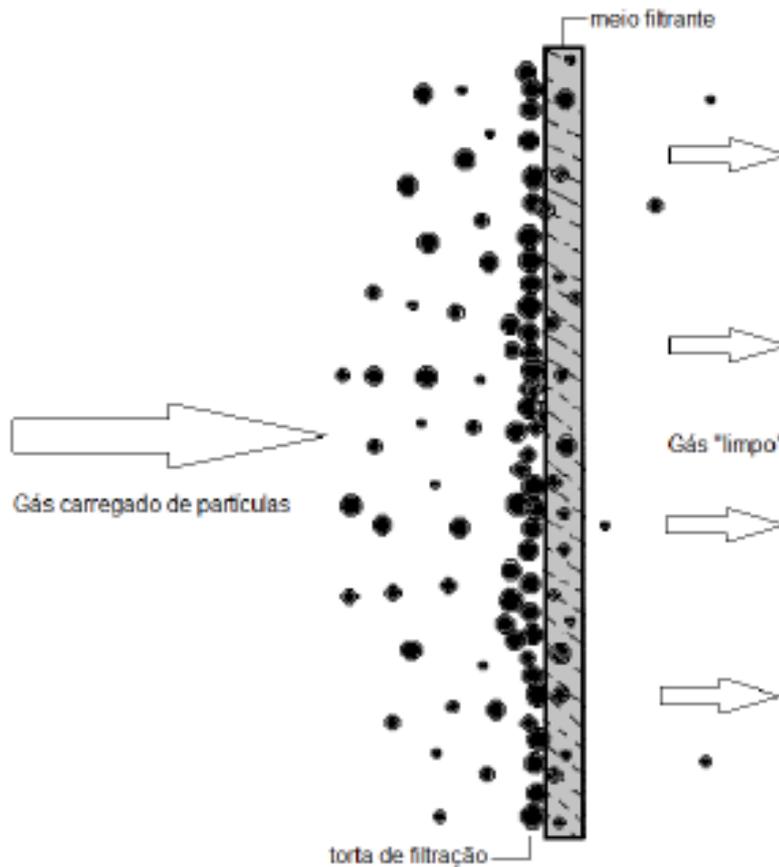


Figura 2.1: Esquema de formação da torta (AROUCA, 2014).

2.3 FILTROS DE MANGA

A interação entre as partículas de poeira transportadas pelo fluxo de fluido e o meio filtrante determina os mecanismos específicos de filtração. Os tecidos filtrantes são frequentemente acabados e tratados superficialmente para facilitar as filtrações eficientes e atender a requisitos funcionais especiais; eles incluem termomecânica, acabamento, revestimento químico de superfície, laminação de membranas porosas e outros tratamentos (MAO, 2018).

Conforme descrito por Ito (2002), para a separação gás-sólido um dos processos mais utilizados é o de filtração de gases. O mesmo consiste em uma corrente gasosa com material

particulado, passando por um meio filtrante sendo que as partículas são depositadas neste meio formando a torta de filtração que nada mais é do que uma camada de pó.

Existem muitos meios filtrantes no mercado, sejam eles sintéticos ou naturais. Para separação gás-sólido analisando a viabilidade financeira, a fácil operação e a eficiência na remoção de partículas, podendo chegar a 99% em uma ampla faixa granulométrica, um dos filtros mais empregados são os filtros de mangas (tecidos) (ITO, 2002; AROUCA, 2014).

Segundo Sanches *et al.* (1997) filtros de manga podem ser definidos como coletores de partículas que atuam na remoção de material pulverulento da corrente gasosa durante a filtração.

A operação de filtração em filtros-manga se desenvolve a partir de um tecido limpo (ou virgem), em uma sequência de etapas. O comportamento e duração de cada fase são determinados por uma série de fatores (RODRIGUES, 2006).

A filtração em filtro de manga nada mais é do que a passagem de uma suspensão de partículas em um gás através de um meio filtrante poroso que retém as partículas em suspensão. À medida que a suspensão escoar através do meio filtrante, as partículas são retidas na superfície formando uma torta de pó que dificulta a passagem do fluxo pelo filtro e, conseqüentemente, aumentando a queda de pressão através dele (SILVA NETO, 2002).

2.4 FORMAÇÃO DA TORTA

De acordo com Tanabe (2008) a formação das tortas de filtração se dá por três etapas. Essas consistem em: 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 (RODRIGUES, 2006). Essa retenção só ocorrerá após a limpeza do filtro ou então quando a superfície estiver limpa, fazendo com que a carga de pó seja completamente retida ou acumulada na superfície do não tecido. Logo a intensidade de penetração das partículas tem a tendência de diminuir com o tempo de filtração causando o aumento da eficiência de coleta das partículas e com isso a queda de pressão irá aumentar. Faz-se necessária a limpeza do meio filtrante quando a queda de pressão máxima pré-estabelecida é atingida. (WALSH, 1996).

Na Figura 2.2 é possível observar as filtrações de profundidade e superficial.

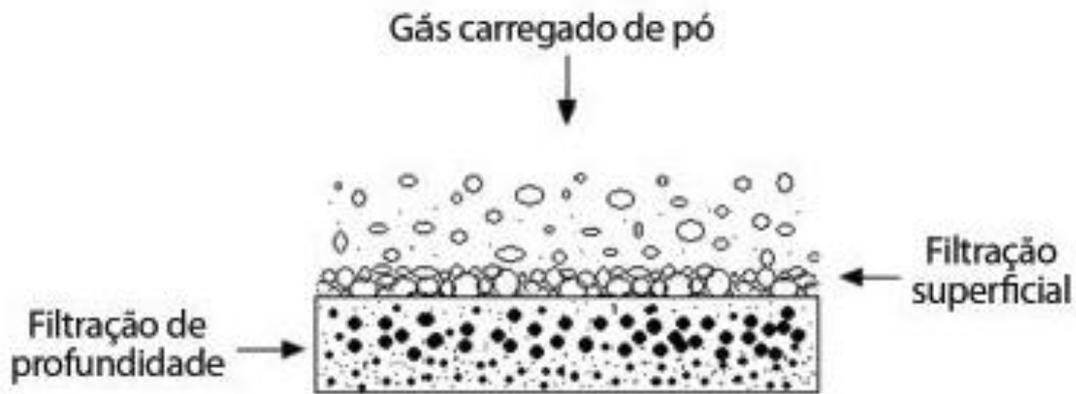


Figura 2.2: Filtração de profundidade e superficial (NUNES, 2012).

Quando ocorre a segunda etapa conhecida como transição existe a formação de dendritos. Estes consistem em estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio filtrante. Assim que forma-se a torta se tem o início da filtração superficial em que a torta de filtração fará o trabalho do meio filtrante, com isso adquire capacidade para remoção das partículas mais finas da corrente gasosa. Portanto, quanto mais rápida a obtenção da filtração superficial melhor a eficiência de remoção de partículas do sistema (RODRIGUES, 2006).

2.5 QUEDA DE PRESSÃO NO FILTRO DE MANGA

A filtração em filtros de manga é definida na passagem de suspensão de partículas em gás aerossol através de um meio filtrante, com o tempo as partículas são retidas na fibra do filtro formando uma torta de pó que dificulta o fluxo pelo filtro acarretando assim o aumento da queda de pressão através deste filtro (SILVA NETO, 2002; RODRIGUES, 2004). A queda de pressão estabelece o trabalho necessário para que o escoamento de um fluido consiga ultrapassar as forças de atrito em um escoamento interno. Após sua passagem sobre o meio filtrante, poroso, o mesmo é definido através da diferença entre as pressões de entrada e saída do equipamento (ROCHA, 2010; GEANKOPLIS, 2003).

A definição de queda de pressão total de um filtro é dada em duas partes: a primeira consiste na somatória entre a queda de pressão do meio filtrante e a segunda se dá pela queda de pressão vinda da formação da torta. (BARBOSA, 2014).

Cavasseno (1980), explica que os maiores gastos de energia se dão em faixas com quedas de pressão mais elevadas, logo se tem a importância da pressão no filtro. Deve-se

também destacar que o aumento da queda de pressão é diretamente proporcional ao aumento das potências dos equipamentos e conseqüentemente ligado ao gasto de energia (AROUCA, 2014).

Em meios porosos consolidados o escoamento é equivalente aos de leitos sólidos granulares. (PERRY; GREEN, 1984). Isso acarretará na semelhança da queda de pressão em função da velocidade superficial de escoamento do gás à função correspondente nos sólidos granulares, ou seja, a transição do escoamento laminar para turbulento é gradual (Aguilar, 1995). É definida em fluídos incompressíveis conforme a Equação (2.1) :

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha_r \mu U_o + \beta_r \rho_g U_o^2 \quad (2.1)$$

Na qual ΔP é caracterizado pela queda de pressão, L é a espessura do filtro, μ é a viscosidade do fluido, β_r consiste no coeficiente de resistência inercial, ρ_g configura na massa específica do gás, α_r é o coeficiente de resistência viscosa e U_o é a velocidade superficial do gás.

Os processos de filtração de gases através de meios porosos usualmente se dão em baixas velocidades (Matesson, 1986) e, nestes casos, o escoamento turbulento não é favorecido porque as fibras do meio poroso evitam a formação de vórtices maiores, em que o fluxo de ar é influenciado pela viscosidade do fluído, que neste caso pode ser considerado puramente viscoso (fluido de Stokes). O componente inercial pode ser considerado desprezível quando o número de Reynolds é baixo. Logo a queda de pressão pode ser representada pela Equação (2.2):

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha_r \mu U_o \quad (2.2)$$

Esta também é chamada de Lei de Darcy. Para escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis através de meios porosos pode-se rearranjar a mesma conforme apresentado na Equação (2.3):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu U_o}{K} \quad (2.3)$$

Logo forma-se uma Equação linear onde o K é o coeficiente angular da curva. Segundo Silva Neto (2002), o mesmo representa a resistência específica do filtro e vai depender do material e porosidade do filtro que conseqüentemente dependem de parâmetros como umidade, velocidade de filtração e características do pó.

2.6 POROSIDADE

De acordo com Silva Neto (2002), a porosidade define a relação dos poros no meio filtrante. A relação existente entre a vazão e a porosidade está ligada a vida útil do tecido, ou seja, quanto mais poroso maior vazão e conseqüentemente maior vida útil. Portanto é um importante parâmetro estrutural do meio filtrante.

O processo de filtração pode ser aperfeiçoado, mas para isso é necessário um detalhado entendimento das características estruturais da torta de filtração. Dentre elas está a porosidade da torta de filtração, no entanto a obtenção desses valores pode ser complexa devido à fragilidade da camada de pó que pode ser alterada durante seu manuseio.

Em conformidade com Arouca (2014), a porosidade pode influenciar diretamente em três quesitos no sistema de filtração. Estes são:

- Queda de Pressão do sistema,
- Resistência ao escoamento do fluído,
- Força necessária para a remoção da torta.

Existem dois métodos para o cálculo da porosidade: experimental e teórico. O primeiro foi desenvolvido por Aguiar (1991), que consiste no pré-endurecimento da torta e análise por microscopia eletrônica e o segundo, também, chamado de método indireto foi elaborado por Coury; Aguiar (1983) em que se usa a Equação de Ergun modificada, que é o método escolhido para o cálculo de porosidade neste trabalho.

2.6.1. Método Indireto ou teórico

A clássica correlação de Ergun (1952) estima a queda de pressão em meios porosos. Conforme constatado experimentalmente por Aguiar (1995) a equação de Ergun pode ser utilizada, tendo boa aplicabilidade, para cálculo da porosidade das tortas de filtração de gases formadas por partículas menores que $10^4 \mu\text{m}$, com números de Reynolds da ordem de 10^2 e partículas com esfericidade menor que 1.

A Equação (2.4) representa a correlação de Ergun (1952), para a remoção de partículas suspensas em corrente gasosa, utilizando filtros de tecido:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 (1-\varepsilon)^2 \mu V_f}{\varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75 (1-\varepsilon) \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p} \quad (2.4)$$

È possível observar que a porosidade da torta é dada em função da espessura da torta de filtração. Dentre as variáveis, cujos valores são conhecidos tem-se: ΔP que consiste na queda de pressão na torta (definida com a diferença entre a pressão a jusante e a montante do filtro), L sendo a espessura da torta de filtração, μ é a viscosidade do gás de arraste, a porosidade da torta é representada por ε , o d_p é o diâmetro médio das partículas e V_f é a velocidade superficial do gás.

Neste método Indireto de Coury; Aguiar (1983) considera-se as seguintes hipóteses:

- Partículas esféricas,
- Porosidade da torta é constante e há alta eficiência de coleta,
- Escoamento puramente viscoso (gases),
- Meios porosos homogêneos e incompressíveis.

Então é possível calcular a espessura da torta de filtração. Uma vez que a massa de partículas M depositada para formar a torta, num tempo t de filtração pode ser dada pela Equação (2.5):

$$M = Qt = L A \rho_p (1-\varepsilon) \quad (2.5)$$

No qual Q consiste na vazão mássica, ρ_p é a densidade da partícula e A é a área de filtração. Isolando-se L na Equação (2.5) e substituindo na Equação (2.4) obtém-se a equação (2.6), a qual permite calcular o valor de :

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150 (1-\varepsilon)^2 Q \mu V_f}{A \rho_p \varepsilon^3 d_p^2} + \frac{1,75 (1-\varepsilon) Q \rho_g V_f^2}{\varepsilon^3 d_p A \rho_p} \quad (2.6)$$

O componente inercial é representado no segundo termo da Equação (2.6) e para escoamentos puramente viscosos, como nos gases, o mesmo é considerado desprezível, então é possível obter a Equação (2.7) também conhecida como correlação de Ergun modificada.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150 (1-\varepsilon)^2 Q \mu V_f}{A \rho_p \varepsilon^3 d_p^2} \quad (2.7)$$

Existem diversos mecanismos para a limpeza das tortas formadas e todos dependem da porosidade e espessura da torta.

2.7 MECANISMOS DE LIMPEZA

Quando a queda de pressão máxima pré-estabelecida é atingida faz-se necessário usar as técnicas de limpeza para remover a torta de filtração do meio filtrante/tecido. É de suma importância destacar que tal processo de limpeza deve ser feito de forma comedida uma vez que a remoção de torta muito rigorosa pode reduzir a vida útil do tecido e uma má remoção da camada porosa ocasiona um aumento da queda de pressão residual (TANABE, 2008).

Davis (2000) aborda que para categorizar um filtro de tecido ou filtro de mangas deve-se conhecer o método de limpeza a ser aplicado. Com isso, expõe que a remoção de torta do meio filtrante é dada pela combinação dos seguintes efeitos:

- Deflexão do tecido/torta, ou seja, fraturar e separar a torta do tecido;
- Aceleração do tecido/torta, ou seja, o rendimento das forças de separação;
- Fluxo e gás na direção reverso-inversa, ou seja, o rendimento das forças aerodinâmicas que separam o pó do tecido e, conseqüentemente, movem o pó para o coletor.

Desde 1970 vem se destacando diversos trabalhos acerca do desprendimento da torta de filtração. Koch *et al.* (1996) desenvolveram a Tabela 2.1 com uma análise dos resultados das pesquisas dessa área. Os mesmos utilizam o aumento gradual da intensidade de limpeza no mecanismo escolhido, seja por centrifuga ou impulso que são técnicas de aceleração e até mesmo fluxo de ar reverso, ou também a medição da quantidade de pó removida (KOCH *et al.*, 1996).

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 2.1 – 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 (m²)	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	Rocha fosfática
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/m²)	90-1190	200-2400	180-969	50-1000	100-1000	290-870	100-1800
a50 (m/s²)*	124-202	-	93-183	83-521	-	-	300-2000
v50 (m/s)**	-	-	-	0,02-0,07	-	0,02-0,14	0,02-0,62
σ50 (Pa)***	18-163	40-150	33-90	33-90	10000-50000	100-400	400-1000 (ac.) 1000 3000 (fluxo)

O Fluxo de Ar Reverso é um método de limpeza bastante utilizado devido a sua uniformidade, baixo consumo de energia e tem maior vida útil do tecido isso se explica pela operação com velocidades de filtração baixas. No entanto para que utilize essa técnica é necessária à interrupção do processo de filtração para executar a limpeza (AROUCA, 2014).

O aumento da profundidade de deposição das partículas no filtro, por exemplo, pode dificultar o processo de limpeza do meio filtrante, obstruindo a passagem do ar através das fibras do filtro e isso acarreta no aumento da queda de pressão residual do sistema. Para que não existam casos como este se sugere a utilização de baixos valores de tempo e velocidade de filtração, o que resultará em menores profundidades de deposição de partículas. Mas, vale salientar que este não é o único fator a dificultar a limpeza (TANABE, 2008).

As técnicas mais utilizadas são: vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso (TANABE, 2008). A explicação de cada técnica é apresentada na sequência:

- Vibração mecânica: Método antigo, simples tanto na execução quanto na montagem e de menor custo, no entanto é necessária a interrupção da filtração para a limpeza. Através do mesmo é possível remover do tecido o pó que foi coletado através de um motor de vibração mecânica nas mangas. (LORA, 2002; AROUCA, 2014).
- Fluxo de ar reverso: O ar limpo é soprado através das mangas no sentido inverso da filtração com o intuito da limpeza da torta no tecido. O ciclo é encerrado após 60 segundos de limpeza já que Tieni (2005) atestou que após esse tempo de limpeza, não há mais desprendimento da torta da filtração. É um método simples e barato, tendo como desvantagem a paralização da filtração para a limpeza, porém tem menor impacto o que acarreta na possibilidade de maior vida útil do tecido. (AROUCA, 2014).
- Pulso de ar reverso: A torta é removida por um pulso de ar comprimido através do tecido, expandindo as mangas e causando desprendimento do pó. Não é necessária interrupção da filtração e ocorre em pouquíssimos segundos, apesar disso diminui a vida útil do tecido (LORA, 2002).

Na maioria das vezes há a remoção de algumas áreas da torta por inteiro e outras áreas permanecem retidas no tecido, durante a limpeza. Esse fenômeno é conhecido como “*patchy cleaning*”, ou seja, limpeza por blocos. O mesmo, após o processo de limpeza, gera uma perda de carga residual, já que o meio filtrante não retorna às suas propriedades iniciais, devido à torta de pó que não pode ser removida, permanecendo aderidas no tecido. Essa perda

de carga residual geralmente alcança um valor constante após vários ciclos de filtração e limpeza (TOGNETTI, 2007).

Conforme Silva Neto (2002), a remoção da torta depende de muitas variáveis do processo então o grau de dificuldade de remoção vai depender da força de adesão entre as partículas e do meio filtrante. Essas forças estão relacionadas com a estrutura da torta, ou seja, com sua porosidade.

2.8 MATERIAL PARTICULADO

Conforme Braga (2001) material particulado é uma mistura de partículas líquidas e/ou sólidas em suspensão no ar. O tamanho das mesmas é diretamente proporcional ao seu tamanho aerodinâmico definido como o diâmetro de uma esfera densa que tem a mesma velocidade de sedimentação que a partícula em questão.

2.8.1 Rocha Fosfática

Souza; Fonseca (2009) citam que a rocha fosfática está contida nos depósitos de origens sedimentares (em torno de 85% da oferta mundial), ígneas (próximo de 15%) e biogênicas, sendo a única fonte de fósforo viável. Em termos mundiais 17% das jazidas fosfáticas naturais (fosfatos), são de origem ígnea com presença acentuada de rocha carbonatítica e minerais micáceos, com baixo teor de P_2O_5 , já no Brasil esse percentual é muito elevado, cerca de 80%.

A produção de fertilizantes utiliza a rocha fosfática como matéria prima está presente em sete empresas no país: Fosfértil, Ultrafértil, Bunge, Copebras, Galvani, Itafós e Socal SA, com atividade nos municípios de Tapira, Araxá, Patos de Minas, e Lagamar no Estado de Minas Gerais; Catalão e Ouvidor em Goiás; Cajati e Registro no estado de São Paulo, Campo Alegre de Lourdes e Irecê no Estado da Bahia e Arraias no Estado de Tocantins. (AMARAL, 1997).

A rocha fosfática utilizada neste trabalho é da empresa Fosfértil da cidade de Patos de Minas no estado de Minas Gerais. A Fosfértil é produtora de insumos fosfatados para a indústria de fertilizantes e também de nitrogenados. A empresa é líder na produção de fertilizantes fosfatados de alta concentração da América Latina. Em Patos de Minas, trabalha com operação de lavra e produção de concentrado de rocha fosfática e em Tapira - MG com

produção de concentrado beneficiado e concentrado ultrafino de fosfato que é transferido via mineroduto com 120 km de extensão até o complexo de Uberaba (ALMEIDA, 2001).

2.8.2 Polvilho

O polvilho tem características diferentes do amido nativo de mandioca, além de se destacar por um sabor típico. É largamente usada na produção de biscoitos e de pães de queijo, produtos de grande consumo no Brasil. A produção de polvilho é dada quando a mandioca é amassada até a mesma se transformar em uma goma à base de amido, que é desidratada até virar um pó branco, alvo e finíssimo. Esta goma também é denominada fécula (MAEDA; CEREDA, 2001).

Segundo Cereda; Nunes (1989), existem dois tipos de polvilho: azedo e o doce. A diferença básica entre os dois se dá pela fermentação. O polvilho azedo pode ser sub-produto da fabricação de farinha de mandioca e de raspas ou pela fermentação do polvilho doce.

O polvilho utilizado neste trabalho foi o polvilho doce da marca AMAFIL, lote: DW312.

2.9 TIPOS DE TECIDOS

O ideal para o sistema de filtração são meios filtrantes com capacidade de retenção de material particulado com máxima eficiência de coleta além de longa vida útil. No entanto existem diversos processos relacionados à filtração no meio industrial e os mesmos são divididos em dois tipos: tecidos trançados e não trançados (NUNES, 2017).

As fibras trançadas em sua maioria são utilizadas em sistemas com baixas velocidades (fluxo de ar reverso e vibração mecânica, por exemplo), porque essas fibras apresentam baixas resistências a corrente gasosa (CERON *et al.*, 2012).

Os tecidos estudados neste trabalho foram fornecidos pela empresa fabricante Gino Cacciari Ltda, localizada no estado de São Paulo (SP). Os mesmos eram constituídos por polipropileno e poliacrilato além de passarem por tratamentos de chamuscagem e calandragem em um de seus lados, com o intuito de facilitar o desprendimento das tortas de filtração durante o processo de limpeza. As especificações dos mesmos são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características do filtro de Polipropileno e Poliacrilato.

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO POLIPROPILENO	ESPECIFICAÇÃO POLIACRILATO
Produto	Feltro de polipropileno	7002 AC
Fibra	100% polipropileno	100% Acrílico
Cor	Branco Natural	Branco Natural
Contextura	-	Agulhado
Espessura	2,1 mm	2,2 mm
Peso	550 g/m ²	550 g/m ²
Permeabilidade no ar	32,5 ½” de H ₂ O	-
Densidade	0,26 g/cm ³	0,25 g/cm ³
Densidade específica	-	1,16
Acabamento	Calandrado e chamuscado de um lado	Calandrado e chamuscado de um lado

Fonte: Dados do fabricante.

2.10 FORÇA DE ADESÃO

Geralmente as forças de adesão entre as partículas e as superfícies aparecem, principalmente, como o resultado das forças eletrostáticas, das forças capilares e de Van der Waals (SALAZAR-BANDA *et al.*, 2007). No entanto, a predominância de uma ou mais destas forças depende das condições ambientais durante as experiências e as propriedades físico-químicas dos materiais que estão em contato (PODCZECK *et al.*, 1996). A adesão é o fenômeno físico pelo qual dois materiais se unem. Existem estudos de partículas - interações de substratos avaliados teoricamente usando modelos analíticos e também experimentalmente utilizando medições de adesão (PETEAN; AGUIAR, 2015).

A força de adesão torta/tecido é um fator determinante para o estabelecimento de um método eficiente de remoção da torta, ou seja, na quantificação da energia necessária para a limpeza de filtros. As interações partícula-partícula também são muito importantes, pois, dependendo de sua intensidade, a porosidade da torta pode ser afetada fazendo com que a mesma se torne mais ou menos quebradiça (AROUCA, 2014).

2.11 METODOLOGIA DE SEVILLE

A força de remoção das tortas de filtração é possível de ser calculada através de um método desenvolvido por Seville *et al.* (1989). Neste, foi considerado o comportamento do escoamento do gás no sentido reverso da operação de filtração também chamado de limpeza.

Considerando que a queda total de pressão no filtro (ΔP_L) é a diferença entre a pressão de entrada e saída do filtro. Esta ΔP_L é dada pelo somatório das quedas de pressão no tecido e na torta. Então se chega até a Equação (2.8):

$$\Delta P_L = K_1 V_f + K_2 V_f W \quad (2.8)$$

Moreira (1998) desenvolveu a hipótese de que a ruptura da torta se dá na interface torta tecido. Então a Equação 2.8 pode ser reescrita na forma (2.9):

$$\Delta P_L = K_1 V_f + \Delta P_{cL} \quad (2.9)$$

No qual ΔP_L é a queda de pressão na limpeza, K_1 é a resistência específica do meio filtrante, K_2 é a resistência específica da torta, V_f é a velocidade do gás na limpeza e ΔP_{CL} é a queda de pressão na torta nas condições críticas de remoção, na limpeza.

Neste método de Seville *et al.* (1989) faz-se necessário cálculo da fração mássica retida (γ) após cada limpeza efetuada no meio filtrante. Calculada conforme a Equação (2.10):

$$\gamma = \frac{W_R}{W} \quad (2.10)$$

Nas figuras (2.3 A e B) ilustram-se os gráficos de velocidade de limpeza e queda de pressão de limpeza X fração de massa retida para o cálculo da força de adesão.

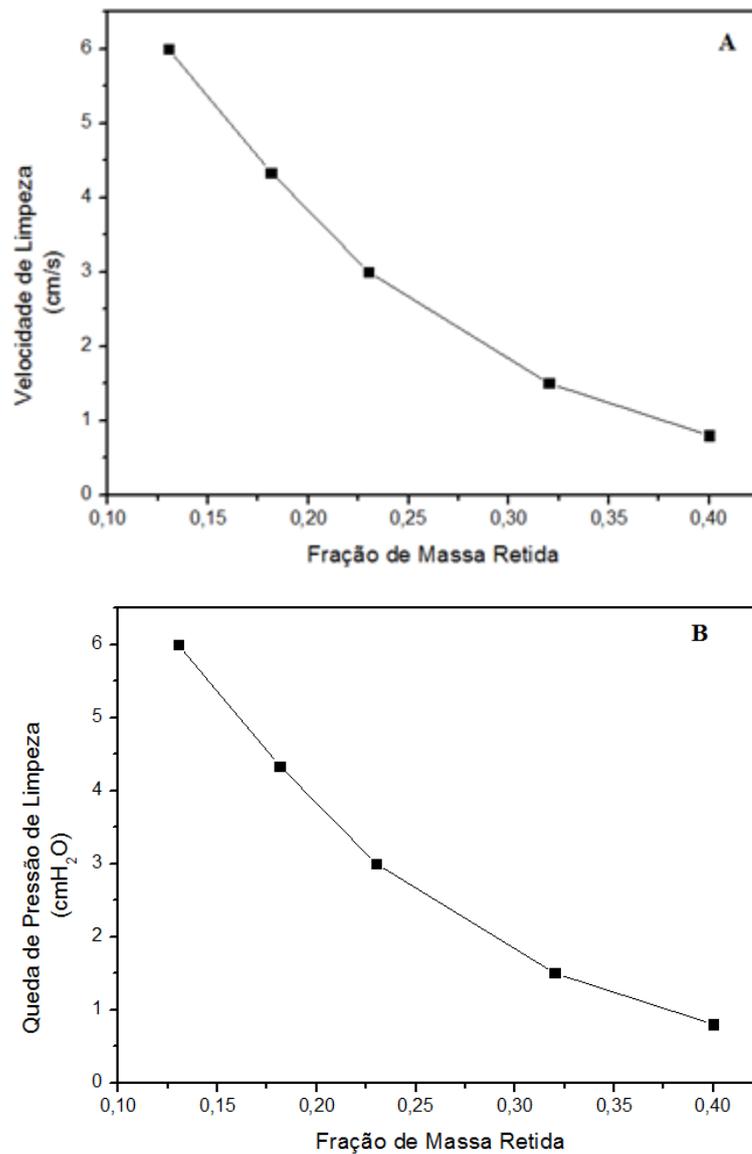


Figura 2.3: Demonstração da primeira (A) e segunda etapa (B) propostas por Seville *et al.* (1989).

Onde inicialmente plota-se um gráfico com as velocidades de limpeza (V_c), que foram preestabelecidas 7, 11, 15,5 cm/s, por a fração de massa retida (γ). Na segunda etapa é plotado um gráfico de queda de pressão na limpeza (ΔP_L), que é encontrado após 60 segundos de limpeza, por a fração de massa retida (γ).

Então se faz a terceira e última etapa que consiste na interação dos valores encontrados nos dois primeiros gráficos do método de Seville. Então plota-se a queda de pressão de limpeza X velocidade de limpeza através da técnica de regressão linear com o intuito de obter o terceiro gráfico. Essa terceira etapa está ilustrada pela Figura (2.4).

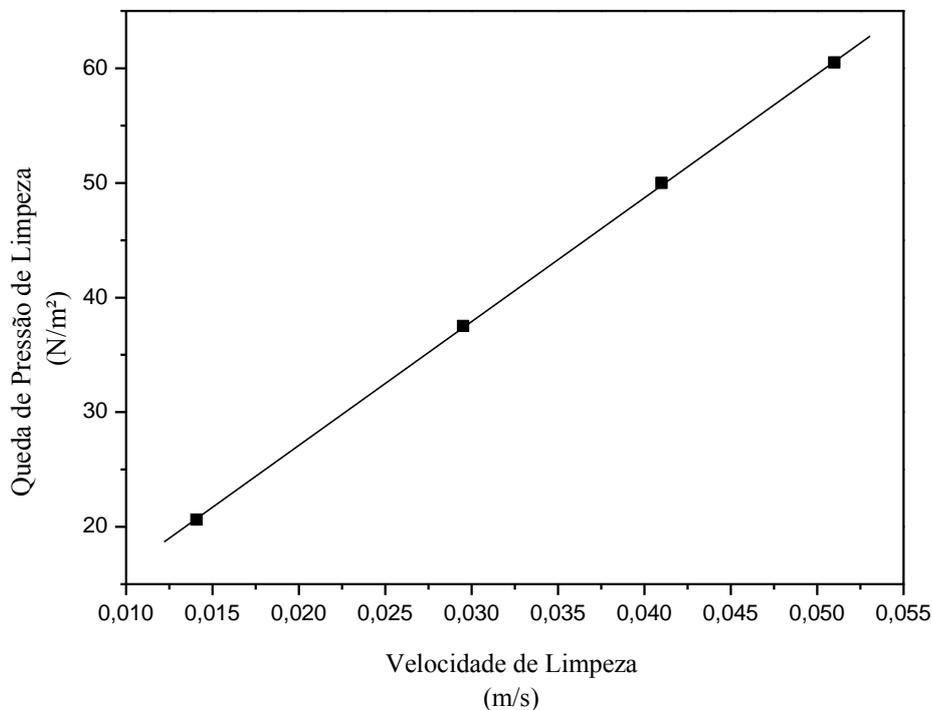


Figura 2.4: Demonstração da terceira etapa propostas por Seville *et al.* (1989).

A Equação obtida para essa função de primeiro grau consiste em $y = ax + b$ em que o coeficiente linear b representa a queda de pressão da torta na limpeza e o coeficiente angular a representa a resistência específica do meio filtrante. A força de adesão pode ser calculada através da Equação (2.11).

$$F_C = \sigma_R A \quad (2.11)$$

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

2.12 OUTROS MÉTODOS DO CÁLCULO DA FORÇA DE ADESÃO

Foi proposto por Hamaker (1937) uma Equação com o intuito de calcular as forças de Van der Waals entre duas esferas conforme a Equação (2.12):

$$F_W = \frac{H}{12a^2} \left(\frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right) \quad (2.12)$$

Em que d_1 e d_2 são diâmetros das esferas, a representa a distância entre as duas superfícies e H é a constante de Hamaker (ordem de grandeza varia de 10 a 20×10^{-19} Joules).

Através da força de adesão é possível determinar o valor da distância de separação efetiva entre duas superfícies, conforme é possível observar na equação (2.13). Esta premissa foi confirmada por Faustino (2010) em que o mesmo calculou a força de adesão pela técnica centrífuga.

$$a = \sqrt{\frac{H d_p}{12 F_C}} \quad (2.13)$$

Para os cálculos da força de adesão neste trabalho foi adotado o valor de $a = 1,7 \cdot 10^{-9}$ m para a distância efetiva entre as partículas (FAUSTINO, 2010). O mesmo está inserido no intervalo entre $4 \cdot 10^{-10}$ e $4 \cdot 10^{-8}$ dado por Schubert (1981).

O valor da constante de Hamaker (H) utilizado neste trabalho foi de 8×10^{-20} J, para a rocha fosfática e de $5,2 \times 10^{-20}$ J para o polvilho doce, conforme Felicetti (2008).

Existem na literatura as teorias de Rumpf (1962) e de Kendall *et al.* (1986) para determinar a força de adesão em aglomerados de partículas.

2.12.1 Método de Rumpf (1962)

Rumpf desenvolveu um técnica teórica para o cálculo da tensão normal σ^* e consequentemente a força de adesão aplicada a um aglomerado de partículas com um diâmetro de partícula (dp) específico. A Equação 2.14 fornece o valor da tensão normal:

$$\sigma^* = n \cdot F \quad (2.14)$$

Na qual a força média que atua nos pontos de contato é representada por F e n é o número médio de contatos partícula - partícula por unidade de área numa seção transversal do aglomerado, Equação 2.15:

$$n=1,1 (1-\varepsilon)\varepsilon^{-1} d_p^{-2} \quad (2.15)$$

Considerando que o aglomerado é seco e inerte, além de duas esferas de mesmo diâmetro a força de adesão pode ser reescrita, considerando a Equação 2.12, na forma da Equação 2.16:

$$F_{W}=\frac{H}{24a^2} d_p \quad (2.16)$$

Fazendo a substituição da Equação 2.16 na Equação 2.14, é possível calcular a tensão de ruptura do aglomerado dada por Rumpf (σ_{R-R}^*), conforme mostrado na Equação 2.17:

$$\sigma_{R-R}^*=0,046 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon} \frac{H}{d_p a^2} \quad (2.17)$$

2.12.2 Método de Kendall *et al.* (1986)

Para Kendall *et al.*(1986), existe uma analogia à ruptura de materiais cristalinos e o número médio de contatos partícula-partícula por unidade de área. Então é possível chegar até a Equação 2.18:

$$n=13,3 (1-\varepsilon)(1-\varepsilon)^4 d_p^{-2} \quad (2.18)$$

Seguindo o mesmo critério de Rumpf, a tensão de ruptura do aglomerado (σ_{R-K}^*) pode ser calculada pela Equação (2.19).

$$\sigma_{R-K}^*=0,554 (1-\varepsilon)^4 \frac{H}{d_p a^2} \quad (2.19)$$

2.13 TRABALHOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Silva Neto (2002), em seu trabalho intitulado: “Estudo da porosidade de tortas em filtros de manga operando na filtração de gases” usou feltro de poliéster como meio filtrante e concentrado fosfático na qualidade de material fosfático. Conforme o título indica o mesmo fez análise do cálculo da porosidade tanto pelo método experimental dado por Aguiar (1991) quanto pela Equação de Ergun. Através dos resultados obtidos foi possível observar divergências dos valores de porosidade pelos diferentes métodos.

“Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão” por Rodrigues (2004), o autor utilizou-se do processo de fluxo de ar reverso para limpar o filtro de tecido removendo assim as tortas formadas, o cálculo da remoção foi feito através do método proposto por Seville *et al* (1989). Foram utilizadas como velocidades de gás na filtração 4,5; 6,0; 7,5 e 9,0 cm/s e quedas finais de pressão de filtração 300; 400 e 500 mmH₂O. Nos procedimentos de remoção por fluxo de ar reverso foram utilizadas seis velocidades de gás 1,6; 3,0; 9,0; 12,0; 15,0 e 18,0 cm/s. Conclui-se que o tecido de algodão apontou menor porosidade que o tecido de polipropileno. Com o aumento da velocidade de filtração, indiferente do tipo de tecido, a tensão de remoção aumentou, porém o tecido de polipropileno apresentou tensões de remoção maiores.

Produziu-se em 2006 por Ni *et al.*, um modelo computacional com o intuito da simulação da formação e crescimento das tortas de filtração. Além disso, o modelo criado foi capaz de avaliar o desempenho das tortas de filtração considerando algumas forças, como por exemplo, a gravidade, flutuação, arraste de fluidos e forças de Van der Waals que podem afetar diretamente a torta de filtração.

Rodrigues (2006) também trabalhou com filtração de gases com o objetivo de verificar a disposição das partículas do filtrado utilizando diferentes meios filtrantes para que pudessem analisar a diferença dos mesmos em relação à torta de filtração formada, também, após a limpeza, foi feito o cálculo da eficiência de remoção. Foram utilizados no trabalho como material particulado dois tipos de rocha fosfática (fina e grossa) e polvilho. O autor conclui que quando houve a maior perda de carga máxima a profundidade de penetração também foi maior, assim como a resistência específica da torta, que se deve a maior pressão de filtração.

O trabalho intitulado: “Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido” por Fagnoli (2010), utilizou como meios pulverulentos talco e rocha,

fixando velocidades de 10 cm/s e quatro quedas de pressão máximas (300, 600, 900 e 1200 mmH₂O) para o primeiro e cinco quedas de pressão máximas (100, 300, 600, 900 e 1200 mmH₂O) para o segundo. No talco os valores de porosidade média foram maiores em relação aos encontrados para a rocha, isso foi explicado pelo autor devido ao formato das partículas de talco se distanciar muito do formato esférico, além do mesmo ter concluído que a porosidade das tortas de talco tendeu a diminuir com o aumento da velocidade superficial de filtração.

Tanabe (2011) teve como objetivo principal no seu trabalho a análise do comportamento de diferentes meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões. Através da pesquisa o mesmo chegou à conclusão que o aumento da queda de pressão no sistema não afeta a permeabilidade da torta que tende a ter um valor constante. Quando o ensaio, em uma mesma massa de pó encontrou-se uma menor perda de carga no filtro quando a pressão absoluta no sistema era maior. Além de concluir que o aumento da pressão ocasionava tortas mais porosas e menos resistentes ao gás e uma maior eficiência fracionária dos filtros para partículas menores que 5 μm .

Nunes (2012) construiu um sistema de filtração de gases e estudou a influência das variáveis operacionais na formação e remoção das tortas de filtração, particulado fosfático, em filtros de acrílico, poliéster e polipropileno.

Arouca (2014) em seu estudo da influência da frequência de vibração perpendicular na formação da torta chegou à conclusão que a vibração mecânica quando adicionada a filtração influencia na torta de filtração, ocasionando tortas menos porosas e espessas, a mesma utilizou como materiais particulados rocha fosfática virgem, moída e polvilho doce. A força de adesão quando acoplada ao sistema a vibração mecânica foi menor.

Barbosa (2014) implantou após a caldeira um sistema de tratamento de gases da queima de resíduos sólidos do bagaço de cana. Através de um duto, os gases do processo eram transportados passando pelo precipitador do tipo ciclone e coletor do tipo filtro de mangas. Foi feito um monitoramento constante do comportamento dos gases e filtro de mangas para coleta de dados através de termopares e transmissor de pressão, sendo ao final do período de operação feita a análise da composição dos gases antes e após filtro de mangas, além da análise do elemento filtrante. Então o autor concluiu que os filtros de manga são eficientes para tratamento de gases de combustão.

Nunes (2017) trabalhou com um sistema de filtração com motor vibrador acoplado ao fluxo gasoso com o intuito de promover o desprendimento da torta de filtração sem que

houvesse interrupção de operação na filtração. Fez-se filtração com polvilho, talco e rocha e estudou a influência da vibração na torta como, por exemplo, na espessura, resistência e porosidade da torta. Com a pesquisa o autor concluiu que o sistema de vibração mecânica independente e intermitente não possibilitou o desprendimento das tortas de filtração, porém influenciou a estrutura de formação das mesmas.

2.13.1 Trabalhos recentes com método microscopia de força atômica (AFM) e técnica centrífuga para o cálculo de força de adesão

Petean; Aguiar (2015), utilizou a técnica centrífuga para medir a distribuição da força de adesão, o pó utilizado foi celulose microcristalina e os materiais utilizados como substratos foram uma membrana de éster de celulose e uma celulose particulada comprimida microcristalina (MCC). As partículas de pó foram inicialmente forçadas na superfície do substrato, centrifugando-os a uma determinada velocidade e, imediatamente após esta etapa, determinou-se o perfil de adesão. O autor fez uma comparação entre os resultados experimentais e os valores teóricos da força de adesão utilizando os modelos propostos por Derjaguin, Muller e Toporov (DMT) e Johnson, Kendall e Roberts (JKR). Embora o Modelo JKR fosse o mais próximo, ambos os valores teóricos desta força foram muito superiores aos valores experimentais.

Cirqueira (2017), em seu trabalho sobre a avaliação das condições de operação durante a filtração por limpeza por jato pulsante analisou diferentes filtros fibrosos. O filtro não tratado apresentou melhor eficiência de limpeza e menor queda de pressão residual o que resultou na regeneração do filtro durante cinquenta ciclos. No entanto, a eficiência de coleta dos filtros não tratados foi menor em comparação com os filtros tratados superficialmente. Os resultados da pesquisa indicam que é importante usar o tratamento de superfície dos filtros, a fim de evitar a deposição profunda de partículas e alcançar alta eficiência de coleta durante ciclos prolongados de filtração.

Zheng (2018) mediu a força de adesão pelo método de microscopia de força atômica (AFM) investigando a interação interfacial do composto de fibra de carbono (CF) pela primeira vez. Três tipos de fibras de carbono com diferentes composições químicas e morfológicas foram usadas neste estudo. Resultados mostram que o 3-aminofenil e fenil fosfina (BAPPO) modificado possui muito maior força de adesão do que a fibra de carbono devido à formação da ligação química nesses componentes.

Rush (2018), em seu artigo estudou amostras de materiais de laboratório já que muitas vezes estes podem estar cobertos de poeira e outros contaminantes. Neste estudo, a microscopia de força atômica (AFM) foi usada para medir a força de adesão entre uma partícula de vidro limpa e lisa (5 μm de diâmetro) e dois lâminas de vidro, preparadas de acordo com práticas laboratoriais comuns (vidro limpo) e segunda deixada ao ar livre por seis semanas (vidro contaminado). Verificou-se que a distribuição da força de adesão foi bimodal para o vidro limpo, enquanto mostrou três picos para o vidro contaminado.

Cao *et al.* (2018) estudou o papel da força de adesão na altura de quedas na superfície da folha de arroz para o difenoconazol. A força de adesão de um pesticida (gotas) na superfície das folhas de arroz foi medida usando um sistema de balanço microeletromecânico de alta sensibilidade, e o comportamento de impacto da gota de pesticida na superfície da folha de arroz foi registrado com uma câmera de alta velocidade. Os resultados revelam que à medida que a concentração de Tween 80 (pesticida) aumenta, a força de adesão das gotas da superfície da folha de arroz aumenta e a altura das quedas saltantes diminui. Uma correlação negativa entre a altura das quedas de salto e a força de adesão é obtida. Estes resultados nos oferecem uma oportunidade para entender melhor o comportamento de impacto da gota de pesticida nas superfícies de cultura alvo, que poderia potencialmente importantes aplicações de pulverização de pesticidas.

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo contempla os principais trabalhos para a evolução da dissertação de mestrado e que, por sua vez, são notáveis devido a sua significativa contribuição ao estudo da força de adesão em processo de separação gás sólido. O capítulo seguinte apresenta os materiais e métodos utilizados com o intuito de quantificar a força de adesão dos materiais pulverulentos com os filtros de tecidos escolhidos.

Nesta seção serão especificados os equipamentos, materiais e métodos que foram utilizados na realização dos testes, assim como a metodologia aplicada para a realização desta dissertação.

3.1 EQUIPAMENTOS

3.1.1 Unidade experimental

Na Figura 3.1 tem-se o equipamento utilizado para a execução dos processos de filtração e de limpeza. Este sistema utilizado pertencente ao laboratório de Filtração Gás-Sólido da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, e já foi utilizado em outras pesquisas da área.

O conjunto é composto por uma caixa de alimentação em acrílico, acoplado a ela, o alimentador de pó, que consiste em um prato giratório e um tubo de Venturi. Compunham também o sistema dois desumidificadores de sílica gel para a passagem do ar comprimido antes de entrar em contato com o pó, com o intuito de não haver interferência da umidade deste ar dentro da caixa de filtração. Tem-se, também, o motor vibratório e os manômetros em U para medir as variações de pressão e as velocidades de filtração e limpeza. Existe ainda, uma caixa de filtração onde se coloca o filtro de tecido para a retenção das partículas e formação da torta, este filtro tem área de 0,0152 m². Incluído neste equipamento está um conjunto de válvulas utilizadas para o controle do fluxo de ar, de modo que o ar possa ser sugado ou soprado durante o processo de filtração ou limpeza, respectivamente.

É importante ressaltar que o motor excêntrico (número 4 da Figura 3.1) neste trabalho não foi utilizado, uma vez que não se empregou vibração mecânica nos testes, já que o intuito do trabalho era calcular a força de adesão em pressões baixas e somente com o efeito da limpeza com velocidades preestabelecidas.

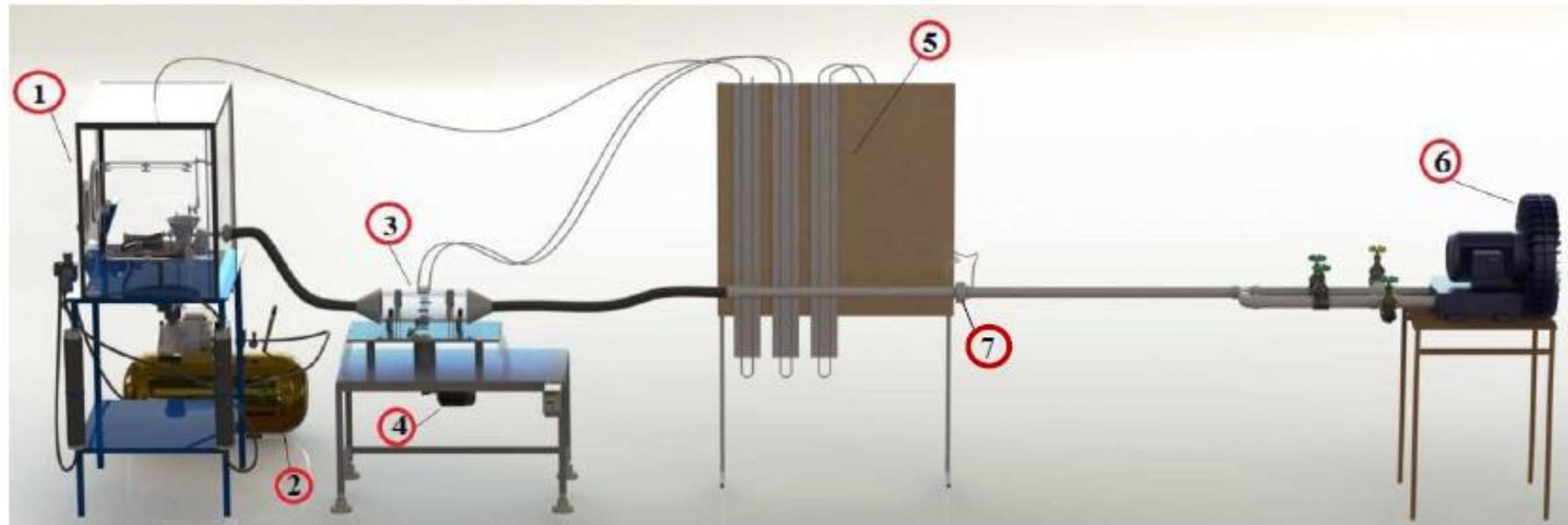


Figura 3.1: Esquema geral da unidade experimental.

Legenda: ① câmara de alimentação ② compressor de ar ③ câmara de filtração ④ motor excêntrico ⑤ monômetros de tubo em U ⑥ soprador
⑦ placa de orifício.

Fonte: AROUCA, 2014.

3.1.2 Sistema de Alimentação de Pó

As dimensões da câmara de poliacrilato são de 62,5 cm de comprimento, 62,5 cm de largura e 80 cm de altura. Vedou-se bem a câmara de filtração, pois através da carta psicométrica havia o ajuste da umidade para valores menores que 20%, então essa vedação evitava que entrasse o ar com diferente umidade, além de evitar perda de carga ou vazamento no interior da caixa. Para possibilitar a alimentação dos materiais no sistema existia uma luva de borracha sintética para que se pudesse manipular a amostra e com a ajuda de uma colher adicionar o pó ao prato giratório inoxidável, de 24,5 cm de diâmetro, com sulcos de seção semicircular além de um coletor para recuperação do pó em excesso no sulco do mesmo. Através da Figura 3.2 pode-se observar de forma esquemática a representação da caixa de alimentação do pó.



Figura 3.2: Esquema do sistema de alimentação.

Fonte: NUNES, 2017.

3.1.3 Caixa de filtração

A câmara de filtração é composta por duas partes cilíndricas tendo 41 cm de comprimento total, sendo cada pedaço com 20,5 cm. Essa divisão da câmara se fez necessária para que fosse possível retirar a torta de filtração e pesá-la. Colocava-se o meio filtrante perpendicular ao sentido do fluxo entre as duas partes cilíndricas com área de 0,0152 m². Na figura 3.3 são mostrados os detalhes da caixa de filtração.



Figura 3.3: Caixa de filtração.

Fonte: Arquivo Pessoal.

É importante ressaltar a presença dos conectores na caixa de filtração. Os mesmos são ligados a duas mangueiras e as mesmas conectadas aos tubos em U para medir a diferença de pressão na torta, conforme ilustra a Figura 3.4



Figura 3.4: Conectores e tubos em U.

Fonte: Arquivo Pessoal.

3.1.4 Soprador

O soprador, do modelo *WEG PLUS*, era utilizado por garantir o fluxo de ar do sistema.

A velocidade do gás de arraste era controlada por sensores e monitorado por um software específico, assim como a queda pressão máxima, ou seja, era possível acompanhar os valores de pressão tanto pelo sistema automatizado quanto pelo tubo em U. O soprador está apresentado nas Figuras 3.5 e 3.6.

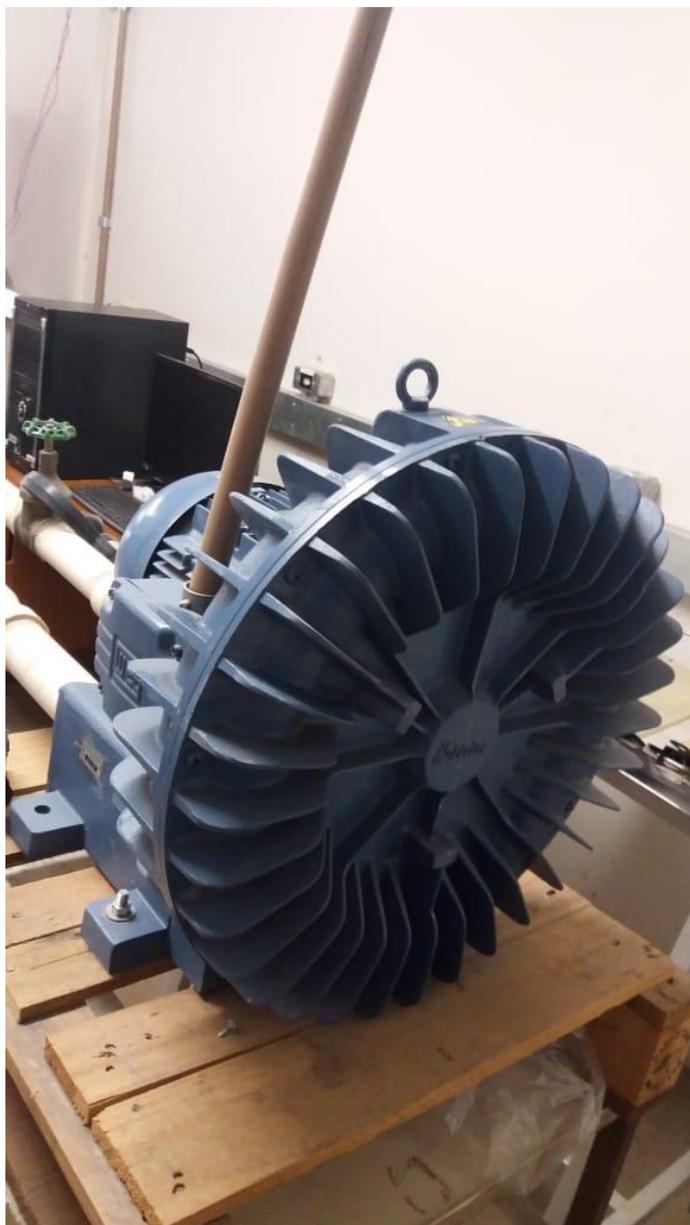


Figura 3.5: Soprador.

Fonte: Arquivo Pessoal.



Figura 3.6: Soprador.

Fonte: Arquivo pessoal.

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Meio Filtrante e materiais particulados

Foram feitos testes preliminares com o intuito de escolher os melhores tecidos e particulados para calcular a força de adesão.

Portanto, os materiais particulados escolhidos para utilizar neste trabalho foram: rocha fosfática moída e polvilho. Já os filtros de tecido escolhidos foram: polipropileno e poliacrílico.

Os filtros foram cortados em forma circular com o intuito de se adequarem a caixa da filtração. Os materiais pulverulentos ficavam durante 24 horas na estufa da marca MedClave, modelo 5, à 105°C com o ideal de se retirar a umidade nos testes.

Fez-se o quarteamento da rocha fosfática moída e do polvilho e com amostras dos mesmos fez-se análise, através da difração a laser, no *Malvern mastersizer* com o intuito de determinar a distribuição granulométrica, bem como diâmetro médio volumétrico e diâmetro médio de *Sauter*. A densidade dos materiais foi obtida por picnometria à gás Hélio, no equipamento *ACCUPYC 1330*, da *Micromeritics*. Estes dados se fazem necessários para o cálculo da porosidade e força de adesão pelos métodos de Kendall *et al* e Rumpf.

Foram, também, realizados testes de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com

o intuito de caracterizar os tecidos e particulados, utilizando um aparelho de MEV da marca Carl Zeiss, modelo EVO MA10.

3.2.2 Outros materiais utilizados

- Balança analítica de precisão, com quatro casas decimais, da marca SHIMADZU, modelo AY220.
- Cronometro digital.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Velocidades de limpeza e filtração

Após estudo bibliográfico foi definida a velocidade de filtração como sendo 10 cm/s, assim como Mattenson (1986). As velocidades de limpeza utilizadas por Tognetti (2007), Tanabe (2008), Fagnoli (2010), Nunes (2012), Arouca (2014) e Nunes (2017) foram de 7, 11, 15,5 cm/s e serão as mesmas adotadas nesse projeto.

As velocidades de limpeza foram mantidas constantes durante 60 segundos, pois já fora constatado que, após esse tempo de limpeza, não há mais desprendimento da torta da filtração. (TIENI, 2005).

3.3.2 Queda de pressão adotada no filtro

Cavasseno (1980), em seu trabalho destacou que, em sua maioria, na prática os filtros de pó coletores são operados com queda de pressão entre 5 e 20 cm de coluna de água, uma vez que essa faixa de operação mostrou ser a melhor, principalmente no ponto de vista econômico. Esta afirmação pode ser justificada visto que em quedas de pressão mais altas tem-se um maior consumo de energia pelo fato de ser requerido o uso de equipamentos com custos mais elevados e mais potentes.

Logo a queda de pressão foi definida seguindo a pesquisa bibliográfica e respeitando o limite/ esgotamento da linha de pesquisa e sendo definida como 20 mmH₂O.

3.3.3 Porosidade

Conforme discutido no Capítulo 2 deste trabalho a porosidade pode ser calculada pelo método experimental (AGUIAR, 1991) ou teórico também conhecido por indireto (COURY; AGUIAR, 1983). Através da Equação de Ergun modificada e o tempo de filtração (experimental) é possível o cálculo da porosidade da torta. O valor de porosidade foi usado para o cálculo da força de adesão por Kendall (1986) e Rumpf (1962).

3.3.4 Método de Seville

Seville *et al* (1989) utilizaram a técnica do fluxo de ar reverso para a limpeza do meio filtrante. Conforme já demonstrado no referencial teórico este método é gráfico. Através dos dados após os 60 segundos de limpeza do filtro e interação entre variação de pressão na limpeza, velocidade de filtração e fração de massa retida é possível calcular a tensão de remoção na torta (σ).

3.3.5 Determinação da força de adesão

Tendo em vista o que fora especificado na sessão anterior após a interação dos gráficos e seguindo o método proposto por Seville *et al.* (1989), é possível obter a tensão de remoção da torta (σ). A força de adesão (F) pode ser obtida pelo produto dos valores de tensão (σ) e remoção e área de filtração (A), como representado na Equação (3.1) a seguir:

$$F = \sigma.A \quad (3.1)$$

3.3.6 Metodologias de Rumpf (1962) e Kendall *et al.* (1986)

Ambas as metodologias foram expostas no capítulo de revisão bibliográfica desta dissertação são diretamente ligadas ao valor da porosidade para que se possa calcular a tensão de remoção da torta e, posteriormente, a força de adesão utilizando o valor da área do filtro.

No capítulo 3 apresentou-se os equipamentos, materiais e a metodologia experimental empregada no desenvolvimento do presente trabalho.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados experimentais obtidos tanto pela filtração quanto caracterização dos meios filtrantes (microscopia eletrônica de varredura - MEV) e dos particulados (pneumometria a gás hélio, Malvern *Mastersizer* e microscopia eletrônica de varredura - MEV, sendo este utilizado para a caracterização tanto dos filtros quanto do pó e os dois primeiros necessários para cálculo de porosidade e força de adesão da torta). Após a exposição desses resultados foram desenvolvidas discussões sobre os mesmos com o intuito de chegar às conclusões e finalizar os objetivos do trabalho.

4.1 CARACTERIZAÇÕES DOS MEIOS FILTRANTES

Para a caracterização inicialmente foram obtidas imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV).

4.1.1 Polipropileno

O tecido de polipropileno utilizado nos testes foi fornecido pela empresa *Gino Cacciari Ltda*, localizada no estado de São Paulo.

Através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Microscopia da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, da marca *Carl Zeiss* e modelo *EVO MAIO*, foi possível fotografar a estrutura superficial do tecido polipropileno. A estrutura superficial deste tecido é menos permeável em relação a outros tecidos como o poliéster, por exemplo (AROUCA, 2014).

Tognetti (2007) explica que os filtros de polipropileno têm menor abertura superficial, logo, 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 que facilita a limpeza do mesmo.

Com base nas Figuras 4.1 e 4.2 é possível observar a estrutura superficial do tecido de polipropileno.

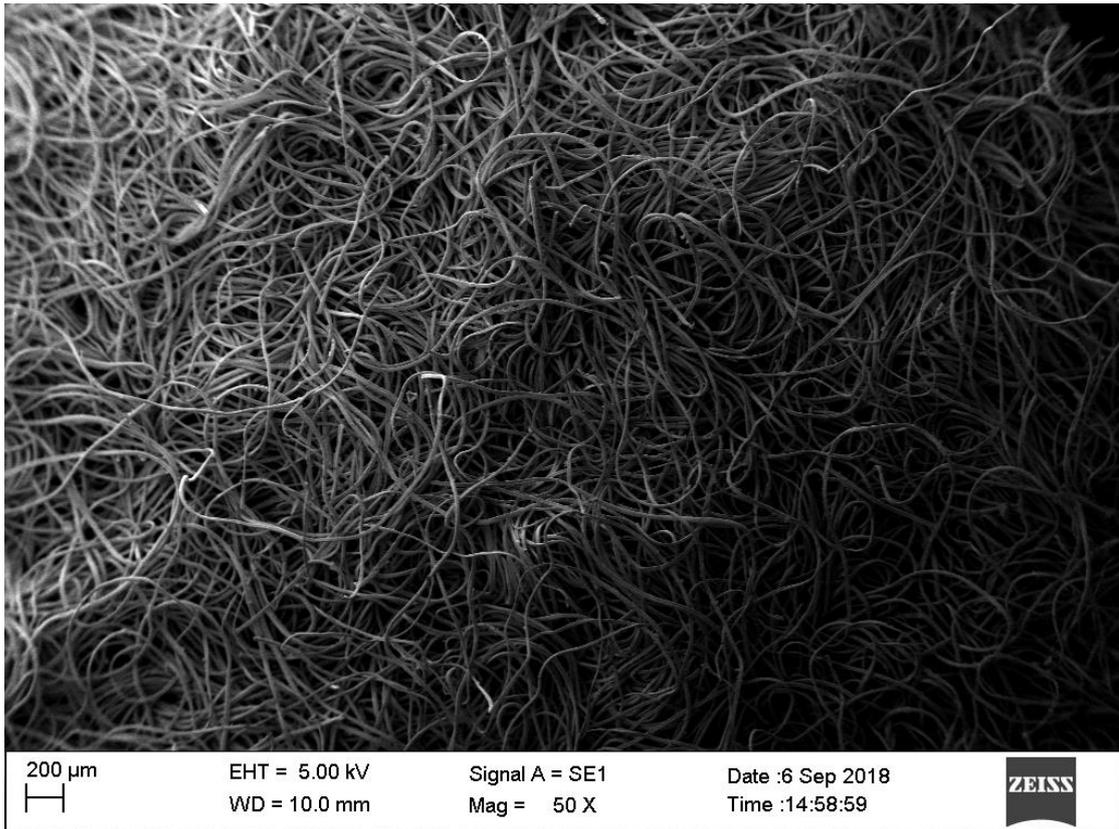


Figura 4.1: Estrutura superficial do tecido polipropileno – 200 μm. Fonte: Arquivo Pessoal.

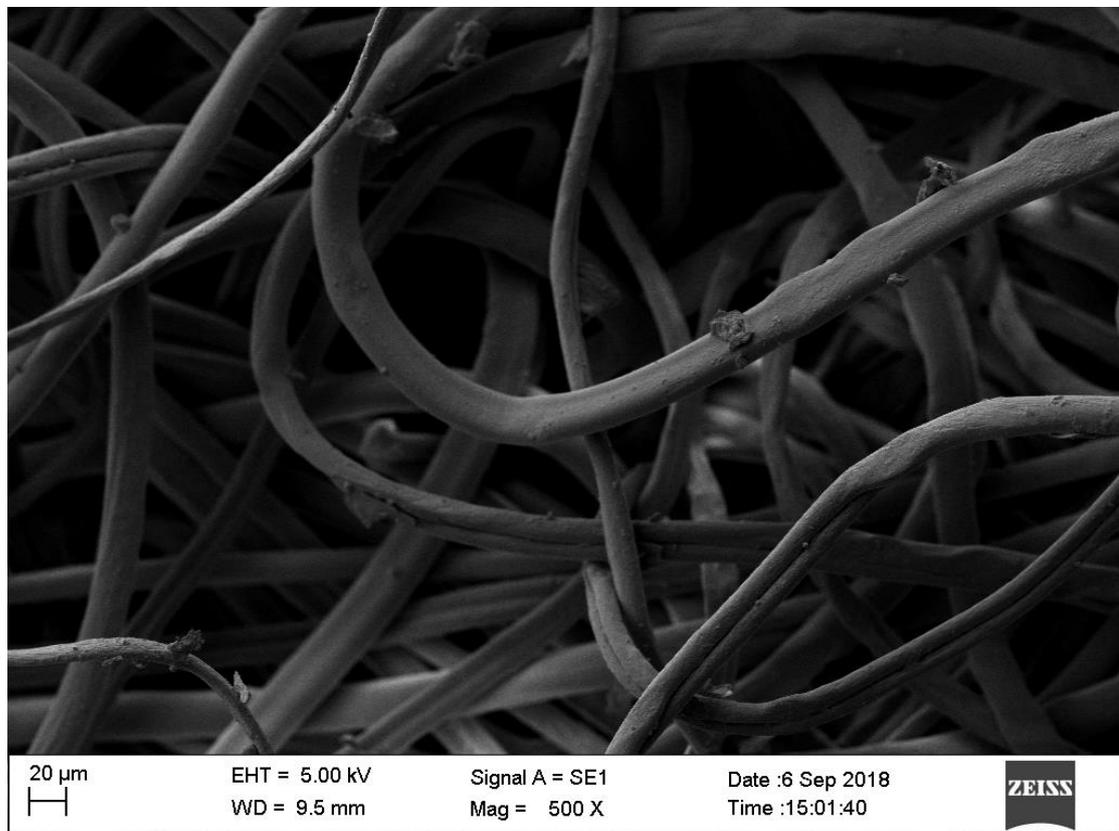


Figura 4.2: Estrutura superficial do tecido polipropileno – 20 μm. Fonte: Arquivo Pessoal.

4.1.2 Poliacrilato

O tecido de poliacrilato utilizado nos testes foi, também, fornecido pela empresa *Gino Cacciari Ltda*, localizada no estado de São Paulo. A caracterização da estrutura superficial deste tecido foi feita através do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) concomitante com o item 4.1.1.

Tognetti (2007) cita que no tecido de poliacrilato se encontra maior abertura superficial e também permeabilidade em relação ao tecido de polipropileno, por isso quando se estudam curvas de filtração com esse tecido as mesmas são mais convexas no início do processo de filtração.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram a estrutura superficial do acrílico.

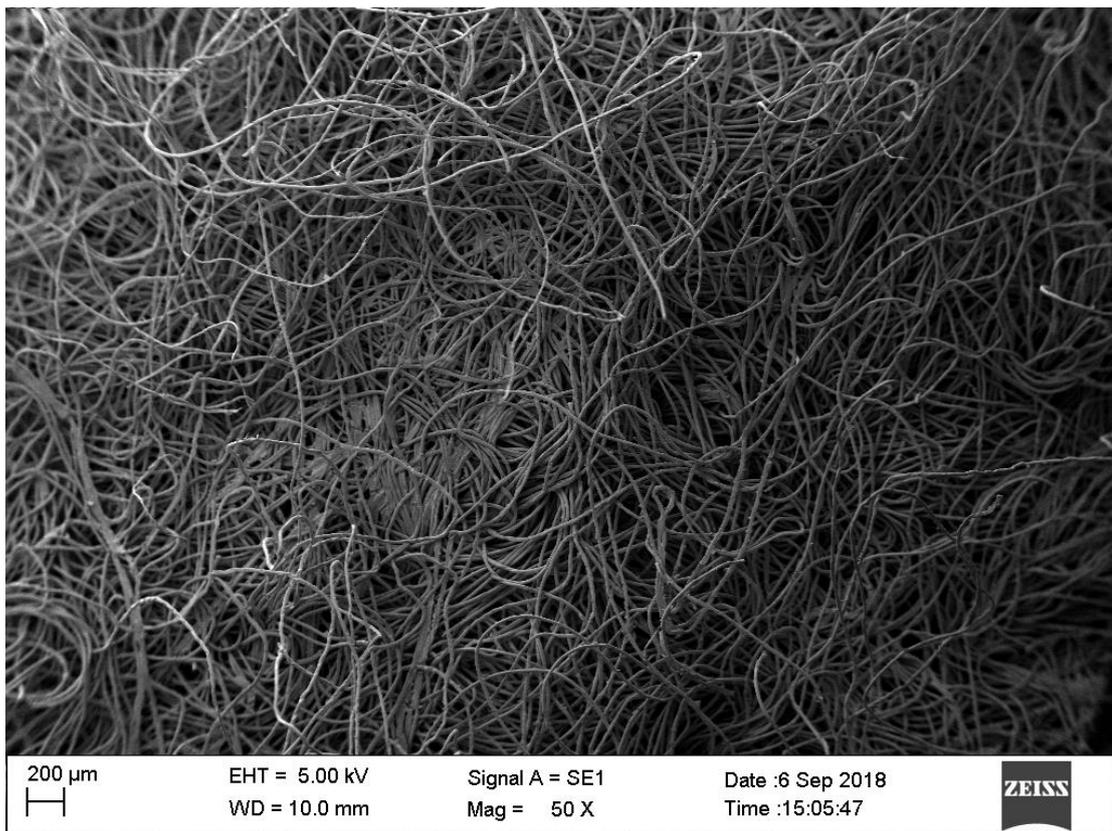


Figura 4.3: Estrutura superficial do tecido poliacrilato – 200 µm. FONTE: Dados da pesquisa.

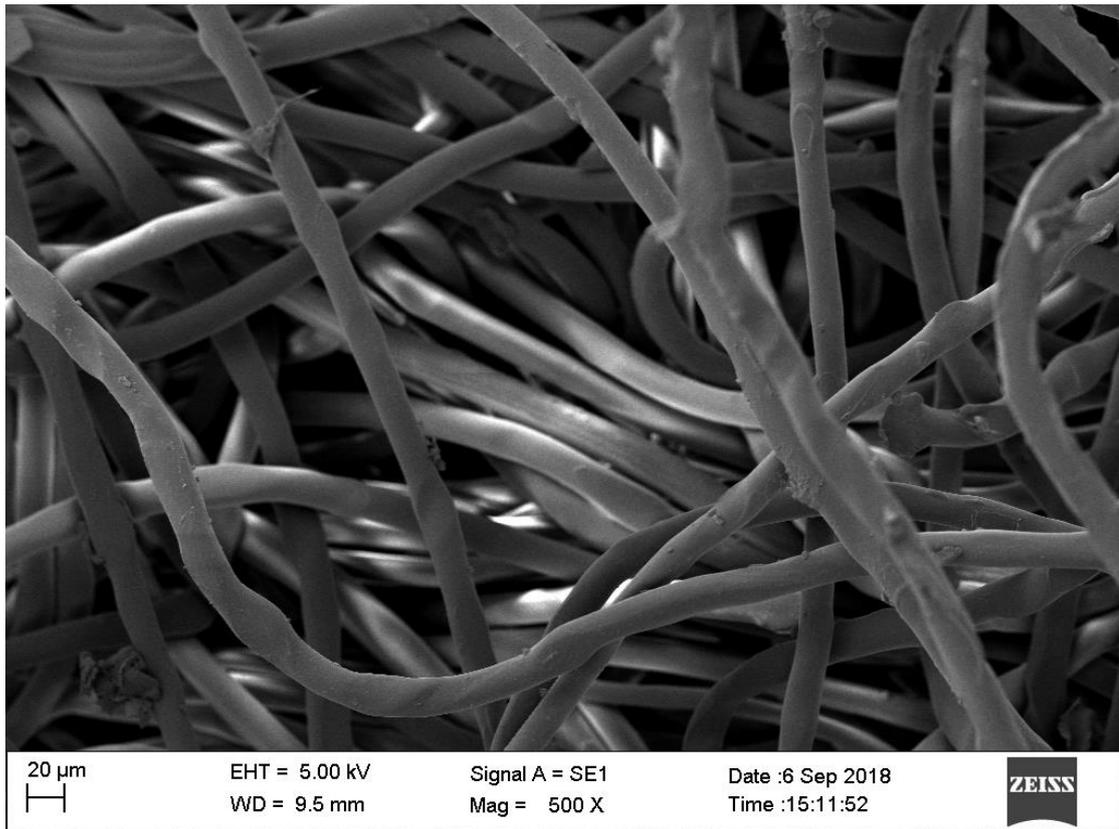


Figura 4.4: Estrutura superficial do tecido poliacrilato – 20 µm. FONTE: Dados da pesquisa.

Através da análise das Figuras é possível concluir que este tecido apresenta uma estrutura superficial fechada, emaranhada e com alto número de *hot spots*, também conhecidos como pontos quentes. Esse fenômeno pode ser explicado pelos processos de calandragem e chamuscagem que o tecido sofreu durante a sua fabricação acarretando pontos fechados na superfície do mesmo, resultado similar ao observado por Nunes (2017).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARTICULADOS

Para a caracterização, inicialmente foram obtidas imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV).

4.2.1 Rocha Fosfática

Conforme já citado anteriormente um dos materiais particulados utilizados nessa pesquisa para o cálculo de força de adesão foi a rocha fosfática moída. A mesma foi disponibilizada pela empresa Fosfértil – *Fertilizantes fosfatados S.A.* da cidade de Patos de

Minas – MG. Este mesmo pó foi utilizado em outras referências bibliográficas com o estudo da filtração de gases, como por exemplo: Fagnoli (2010), Rocha (2010), Nunes (2012), Arouca (2014), Nunes (2017).

A análise da distribuição granulométrica dos materiais foi feita no equipamento *Malven Masterizer Microplus MAF 501* do Laboratório de Caracterização de Partículas da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), utilizando água como solvente conforme manual, isso se deu tanto para a rocha quanto para o polvilho.

Fazendo uso do equipamento *Malvern Mastersizer*, foi possível definir o diâmetro médio das partículas. Este dado foi utilizado para o cálculo da porosidade das tortas de filtração e, conseqüentemente, os valores de força de adesão, já que o parâmetro de porosidade é necessário para os métodos de Rumpf e Kendall. Fez-se também picnometria a gás hélio com o intuito de descobrir a massa específica da partícula utilizou-se o equipamento *ACCUPYC 1330*, da *Micromeritics* da FEQ/UFU. Na Tabela 4.1 é possível observar os valores encontrados para diâmetro médio de partícula e densidade.

Tabela 4.1: Diâmetro médio e massa específica de partícula para a rocha fosfática.

Diâmetro Médio de Partícula	Massa específica da Partícula
45,964 μm .	2,8301 g/cm^3 (desvio padrão 0,0012 g/cm^3)

As Figuras 4.5 e 4.6 foram obtidas pelo MEV, mostram a estrutura da rocha fosfática. 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.

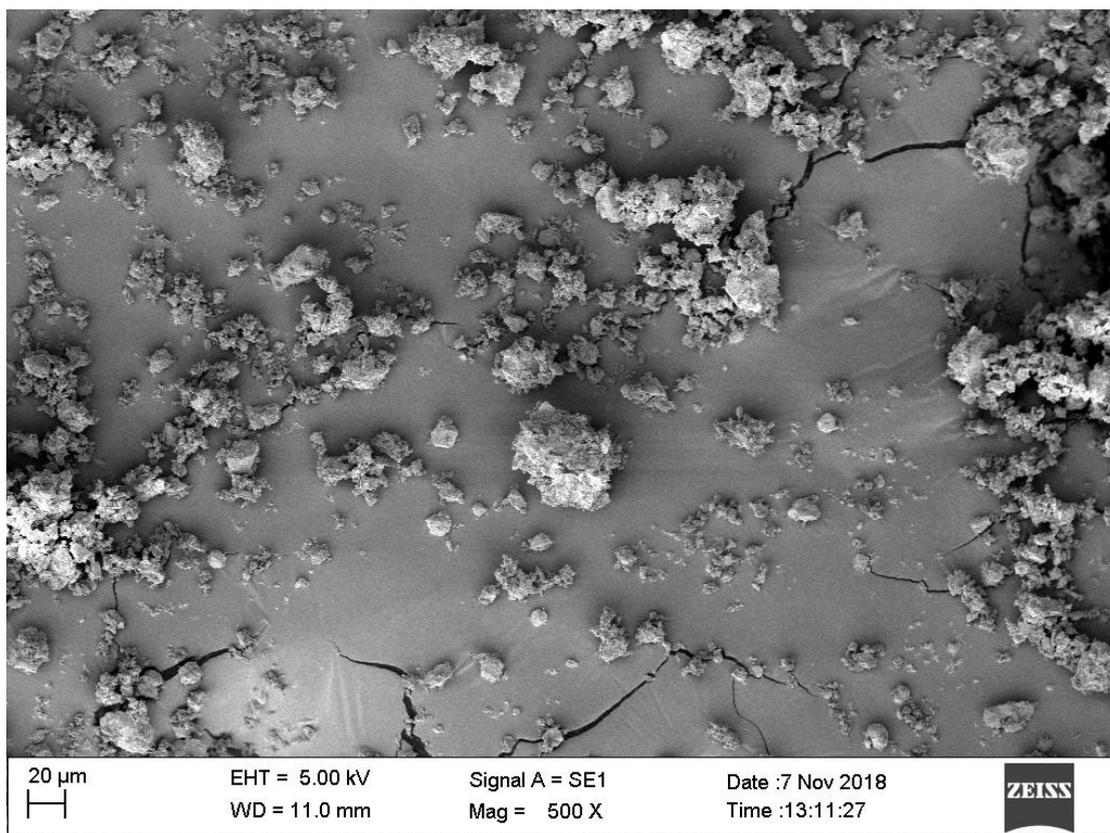


Figura 4.5: Estrutura da rocha fosfática – 20 μm. Fonte: Arquivo Pessoal.

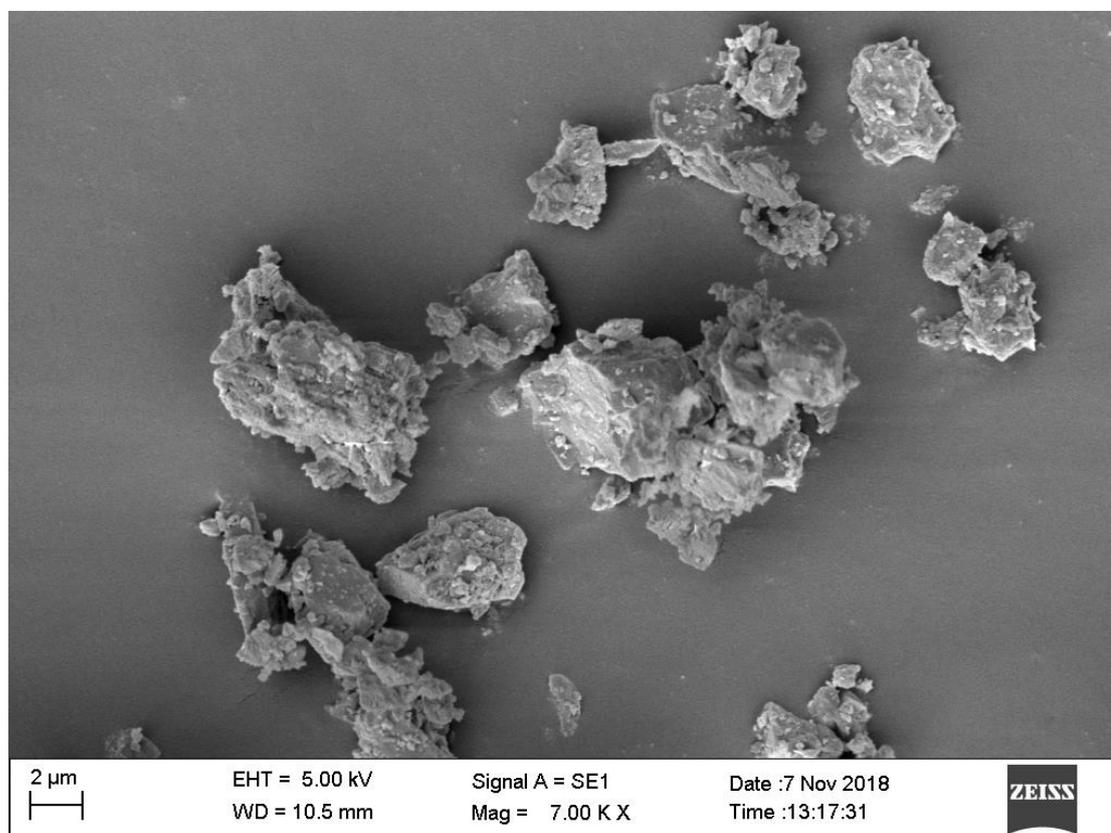


Figura 4.6: Estrutura da rocha fosfática – 2 μm. Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2.2 Polvilho Doce

O polvilho utilizado nos testes era da marca AMAFIL, lote: DW312. Na literatura existem diversos trabalhos que utilizaram como material particulado o polvilho doce. Exemplos desses são: Ito (2002), Felicetti (2008), Rodrigues (2006), Azevedo (2009), Barros (2010), Arouca (2014) e Nunes (2017).

Conforme citado no item 4.2.1 os testes para a caracterização do polvilho foram feitos utilizando os mesmos laboratórios e conseqüentemente os mesmos equipamentos. Na Tabela 4.2 é possível observar os valores de diâmetros médios e densidade de partícula para o polvilho obtidos através de *Mastersizer* e Picnometria a gás hélio, respectivamente.

Tabela 4.2: Diâmetros médio e massa específica de partícula para o polvilho.

Diâmetro Médio de Partícula	Massa específica de Partícula
12,495 μm .	1,4977 g/cm^3 (desvio padrão 0,0012 g/cm^3)

As Figuras 4.7 e 4.8 foram retiradas do programa MEV e mostra a estrutura do polvilho.

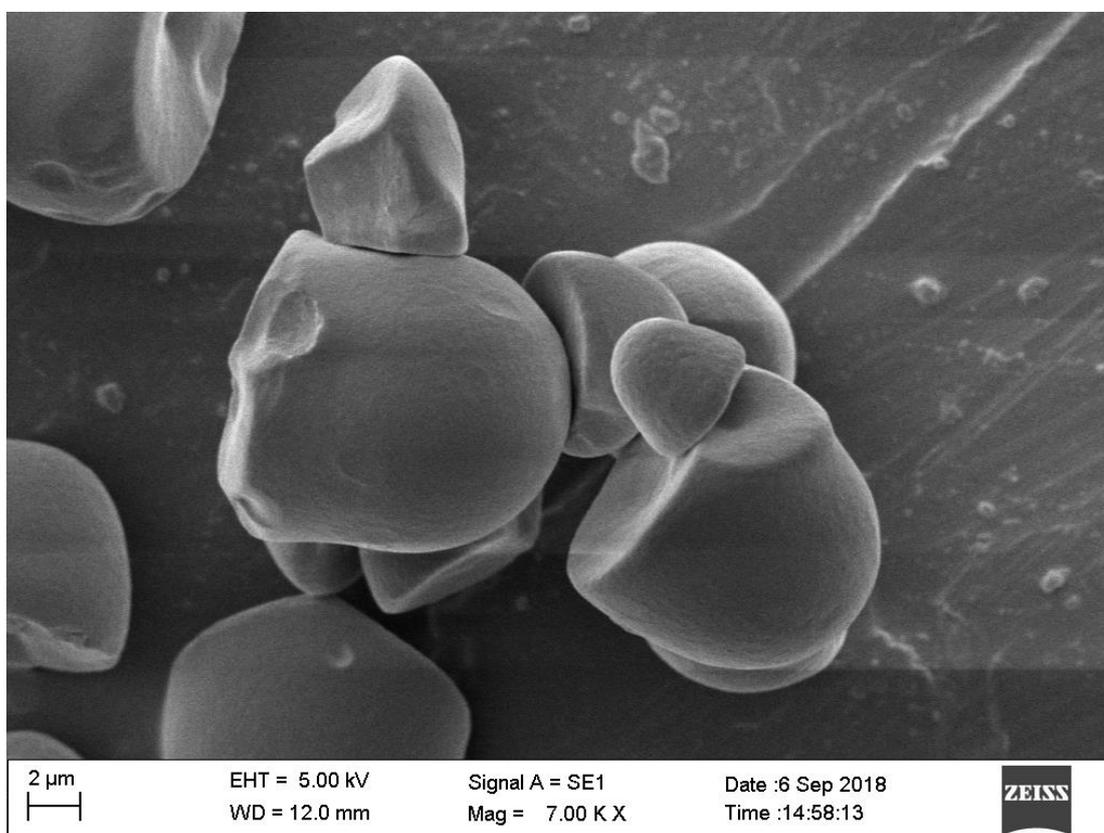


Figura 4.7: Estrutura do polvilho – 2 μm . FONTE: Arquivo Pessoal.

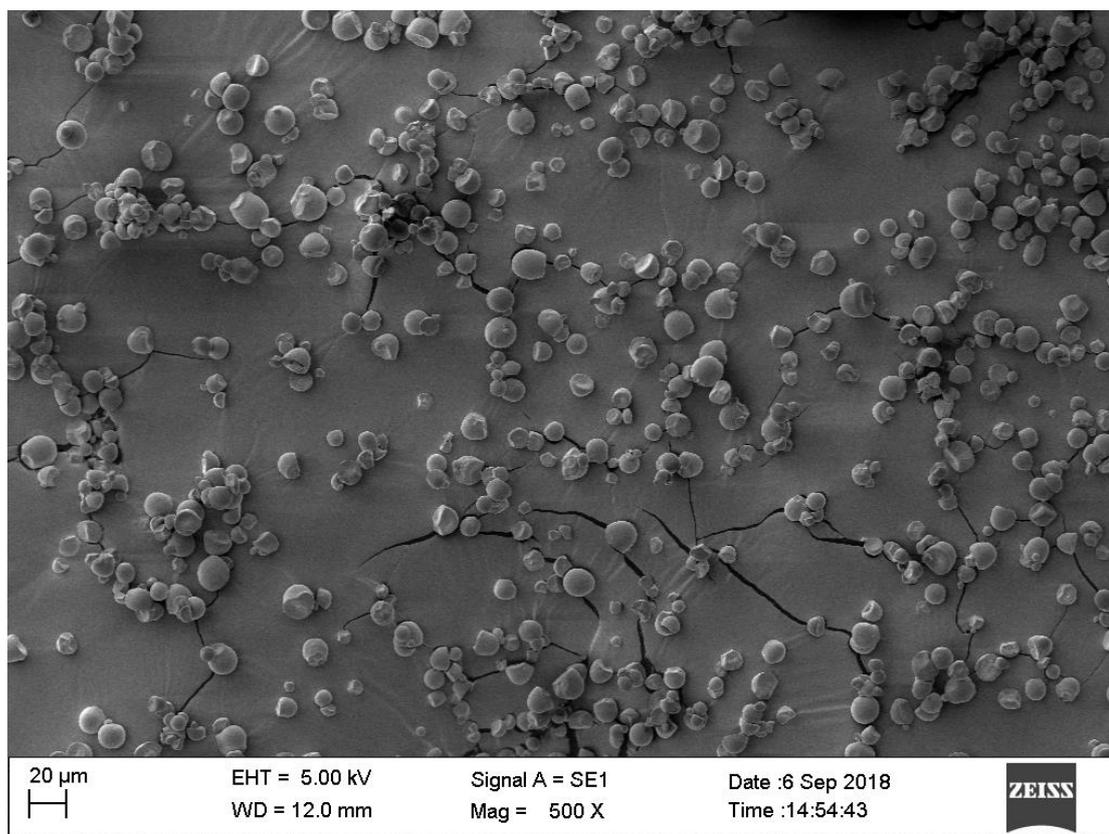


Figura 4.8: Estrutura do polvilho – 20 µm. FONTE: Arquivo Pessoal.

Através da análise das imagens é possível concluir que o polvilho doce é o material de maior esfericidade, quando comparado à rocha. No entanto, a rocha fosfática moída por sua vez, apresenta formatos irregulares.

4.3 CÁLCULO DA FORÇA DE ADESÃO POR SEVILLE *et al.* (1989)

Nesta sessão são demonstrados os gráficos de variação de pressão da torta na limpeza e velocidade de limpeza com a fração de massa retida, seguindo o método de Seville para o cálculo da força de adesão.

4.3.1 Polipropileno e Rocha Fosfática

O primeiro teste realizado foi com o filtro de polipropileno e como pó utilizou-se a rocha fosfática moída. Fez-se testes de filtração em triplicata até se obter a variação de pressão da torta de 20 cmH₂O e após isso realizou a limpeza utilizando as velocidades de 7 cm/s, 11 cm/s e 15,5 cm/s. Seguindo a metodologia de Seville para o cálculo da força de

adesão primeiro foi feita uma regressão linear com os valores de Velocidade de limpeza (V_c) e Fração de massa retida (γ). Obtendo assim o gráfico representado pela Figura 4.9.

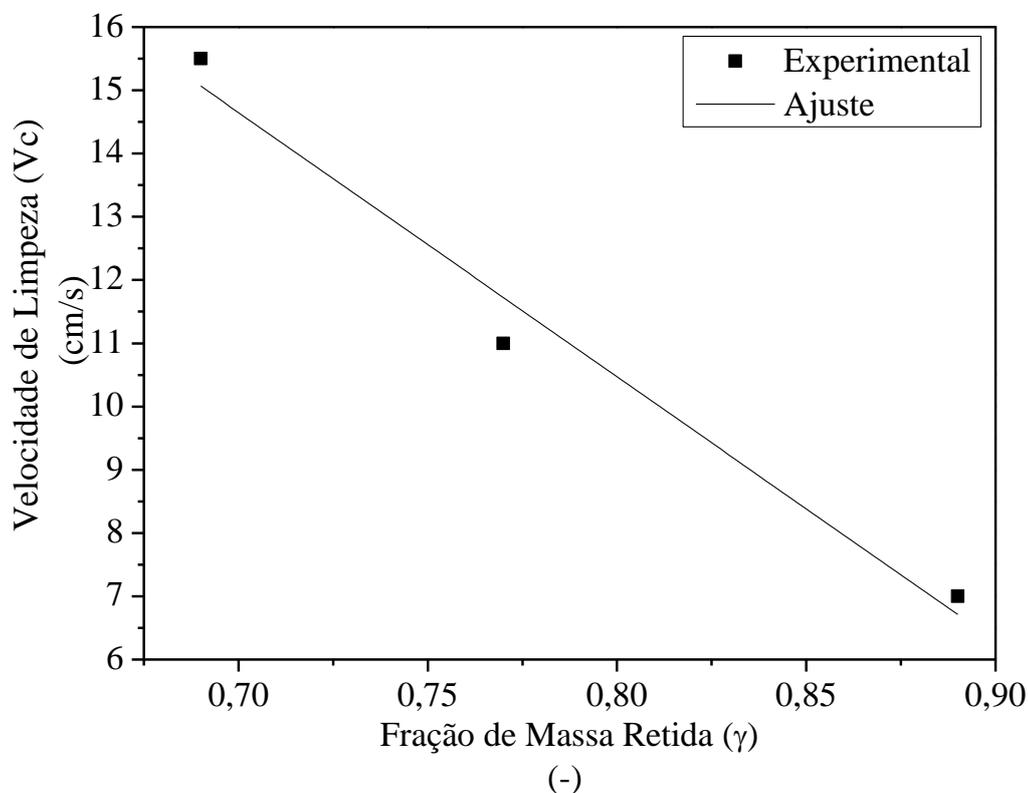


Figura 4.9: Comportamento da Velocidade de Limpeza em função da fração de massa retida

Na Tabela 4.3 se encontram os parâmetros obtidos no gráfico da Figura 4.9. Os valores do desvio das frações de massa retida, respectivamente em relação às limpezas de 7, 11 e 15,5 são 0,004024; 0,050025 e 0,007224.

Tabela 4.3: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.9.

R^2	A	B
0,95598	-41,77632	43,89145

O segundo passo para o cálculo da força de adesão foi a regressão linear utilizando os dados de Variação de pressão na limpeza (ΔP_L) e Fração de massa retida (γ), que é representado pela Figura 4.10.

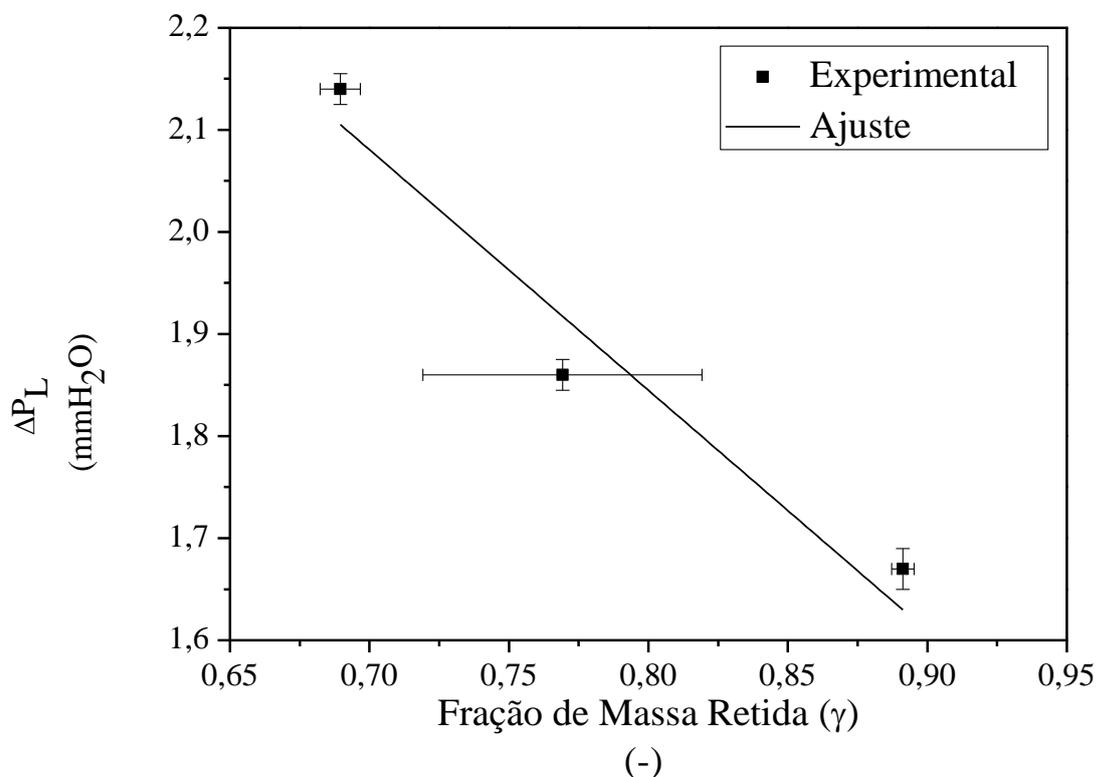


Figura 4.10: Comportamento da variação de pressão da torta em função da fração de massa retida

Na Tabela 4.4 se encontram os parâmetros obtidos no gráfico da Figura 4.10.

Tabela 4.4: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.10.

R^2	A	B
0,93295	-2,44737	3,79711

Fez-se interpolação dos valores obtidos nos dois gráficos da fração de massa retida e se desenvolveu um terceiro gráfico, representado pela Figura 4.11, representando a regressão linear dos dados de Velocidade de limpeza (V_c) e Variação de pressão na limpeza (ΔP_L).

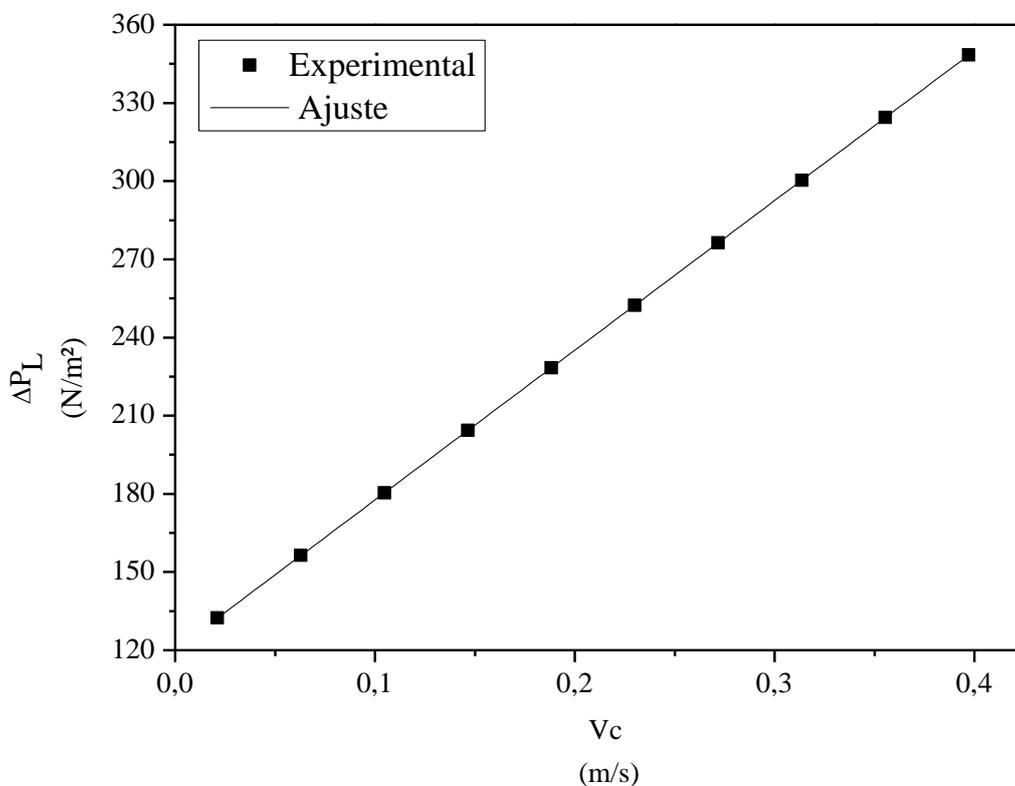


Figura 4.11: Comportamento da variação de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza.

Com base nos valores obtidos da Figura 4.11 e Tabela 4.4 pode-se calcular a força de adesão que se encontra na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Características da torta calculadas.

σ_R (N/m ²)	K_I (N.s/m ³)	F_c [N]
120,20	574,52	1,82

Sendo importante destacar que σ_R representa a tensão de remoção da torta, K_I a resistência específica do filtro e F_c a força de adesão, calculando a mesma através da equação 3.1. Considerando a área de filtração como 0,0152 m².

4.3.2 Poliacrilato e Rocha Fosfática

Utilizando o filtro de poliacrilato e a rocha fosfática como material pulverulento, foi desenvolvida, também, a metodologia de Seville e consequentemente os três passos para o cálculo da força de adesão.

O primeiro passo se deu por uma regressão linear com os valores de Velocidade de limpeza (V_c) fixada em todos os experimentos como 7, 11 e 15,5 cm/s e Fração de massa retida (γ). Desse modo, foi obtido o gráfico representado pela Figura 4.12.

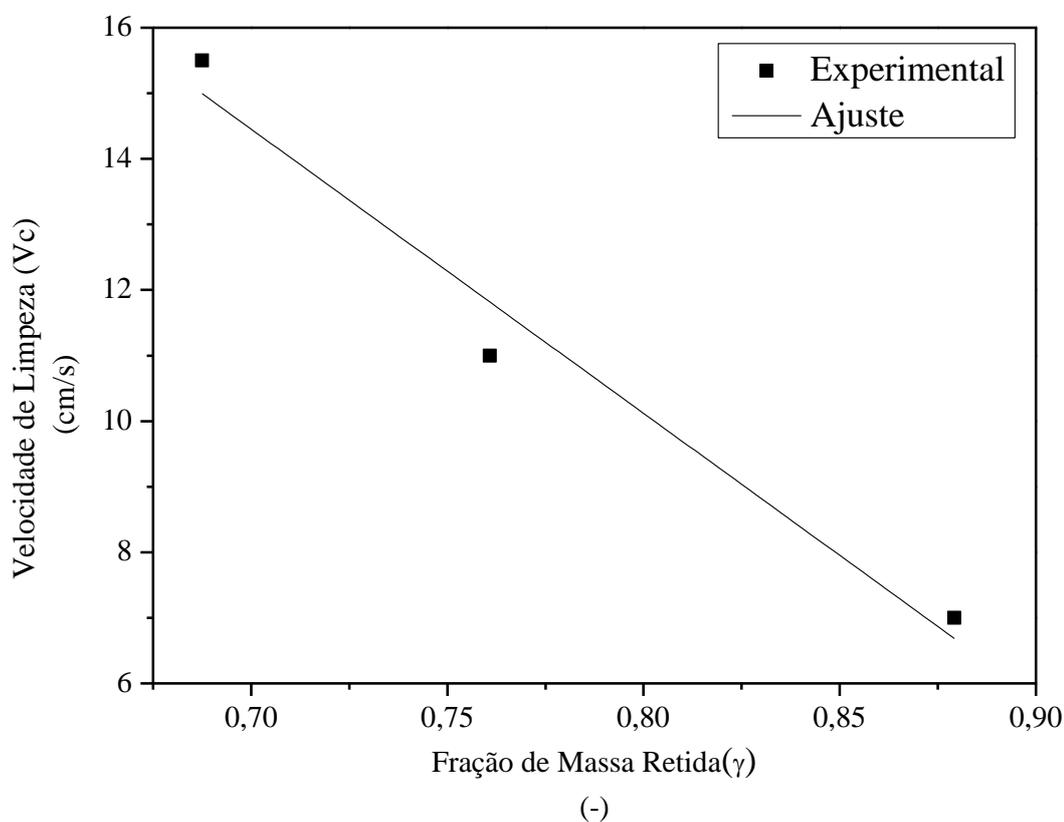


Figura 4.12: Comportamento da Velocidade de Limpeza em função da fração de massa retida

Na Tabela 4.6 é possível observar os coeficientes do gráfico da Figura 4.12. Os valores do desvio das frações de massa retida, respectivamente em relação às limpezas de 7, 11 e 15,5 são 0,0154; 0,0413 e 0,0320.

Tabela 4.6: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura.

R^2	A	b
0,94345	-43,33604	44,78821

Seguindo com a metodologia o próximo passo se da pela regressão dos dados de Fração de massa retida (γ) e Variação de pressão na limpeza (ΔP_L). Esta é demonstrada pela Figura 4.13:

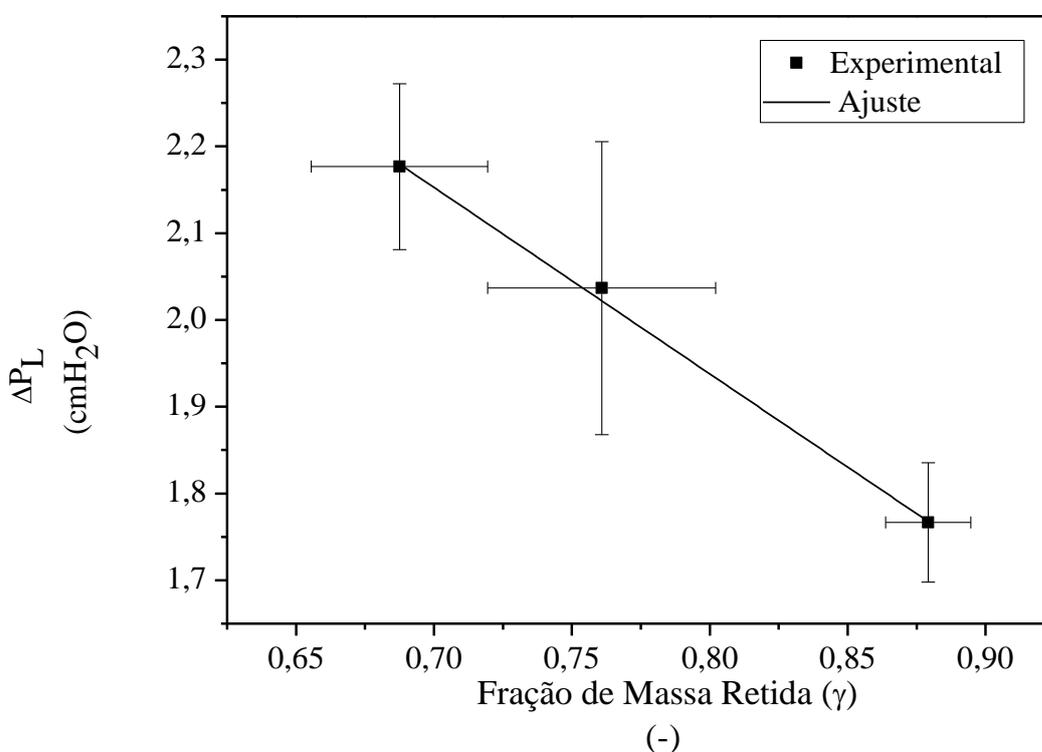


Figura 4.13: Comportamento da variação de pressão da torta em função da fração de massa retida.

Na Tabela 4.7 encontram-se os coeficientes do gráfico da Figura 4.13:

Tabela 4.7: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.13.

R^2	A	B
0,99576	-2,15223	3,66314

Conforme o método de Seville *et al.* (1989) fez-se a interpolação dos pontos originando a regressão linear dos dados de velocidade de limpeza (V_C) e variação de pressão na limpeza (ΔP_L), os mesmos são apresentados na Figura 4.14.

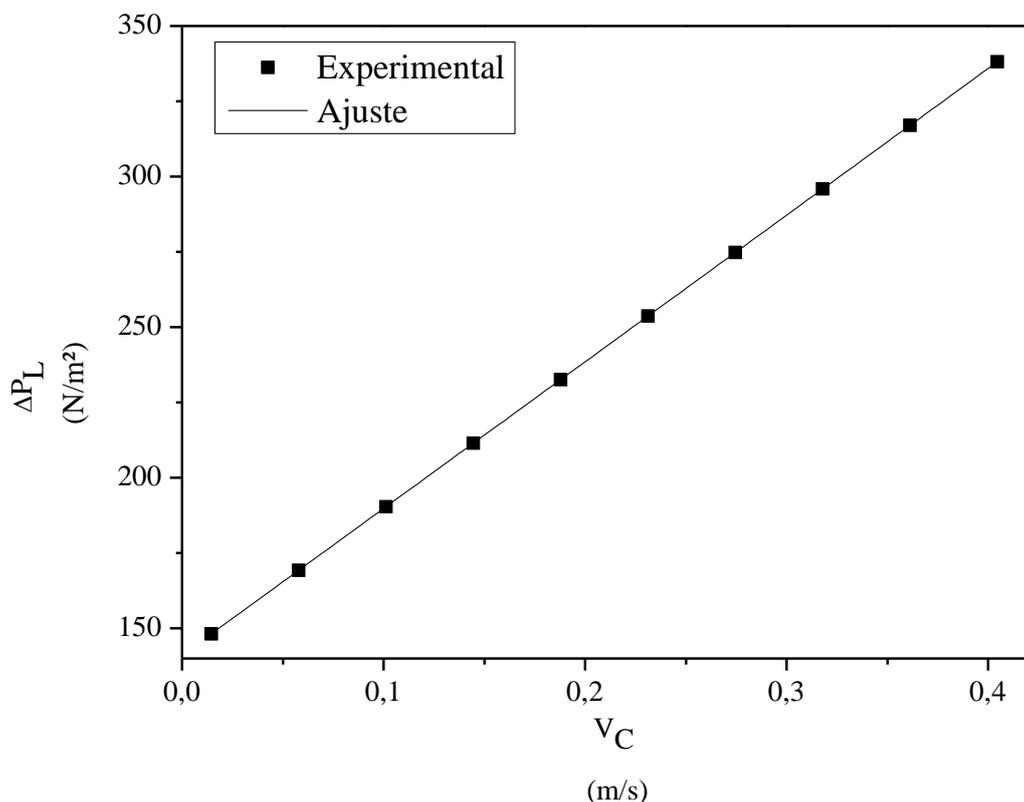


Figura 4.14: Comportamento da variação de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza.

Com base nos valores obtidos com o coeficiente angular e linear da Figura 4.14 pode-se calcular a força de adesão que se encontra na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Características calculadas da torta.

σ_R (N/m ²)	K_I (N.s/m ³)	F_c [N]
141,10	487,02	2,14

Destacando que σ_R representa a tensão de remoção da torta, K_I a resistência específica do filtro e F_c a força de adesão, calculando a mesma através da equação 3.1, sendo a área de filtração como 0,0152 m².

4.3.3 Polipropileno e Polvilho

Utilizando o filtro de polipropileno e o polvilho, fez-se o terceiro cálculo da força de adesão.

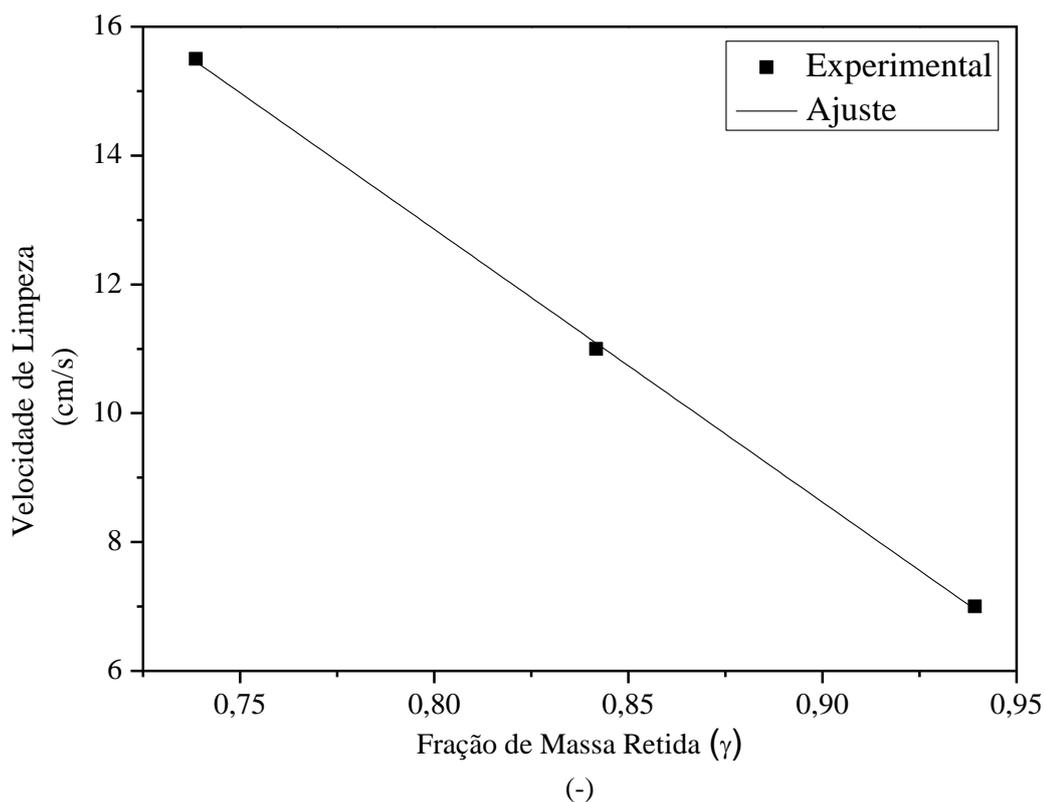


Figura 4.15: Comportamento da Velocidade de Limpeza em função da fração de massa retida

A fração de massa retida pela velocidade de limpeza (V_c) é apresentada pela Figura 4.15. A Tabela 4.9 apresenta os coeficientes do gráfico pela Figura 4.15. Os valores do desvio das frações de massa retida, respectivamente em relação às limpezas de 7, 11 e 15,5 são 0,00426; 0,028798 e 0,050776.

Tabela 4.9: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.15

R^2	A	B
0,9997	-42,376	46,758

Continuando o cálculo da força de adesão entre a rocha fosfática e o polipropileno na Figura 4.16 é apresentado o gráfico dos valores de Fração de massa retida (γ) e variação de pressão na limpeza (ΔP_L), os parâmetros do gráfico são apresentados na Tabela 4.10.

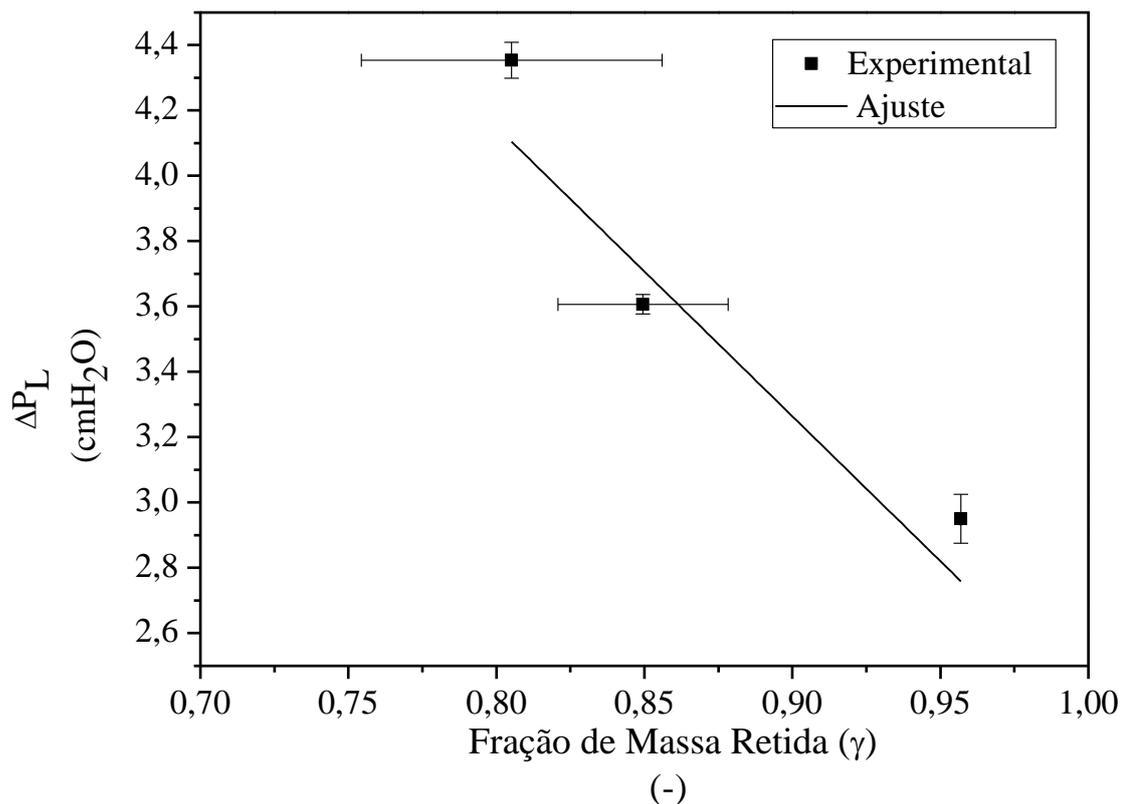


Figura 4.16: Comportamento da variação de pressão da torta em função da fração de massa retida.

Tabela 4.10: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.16.

R ²	A	B
0,8827	-7,7194	97,325

Fez-se a interpolação dos dados e desenvolveu o gráfico/Figura 4.17 em que se encontram os valores de velocidade de limpeza e variação de Pressão na torta.

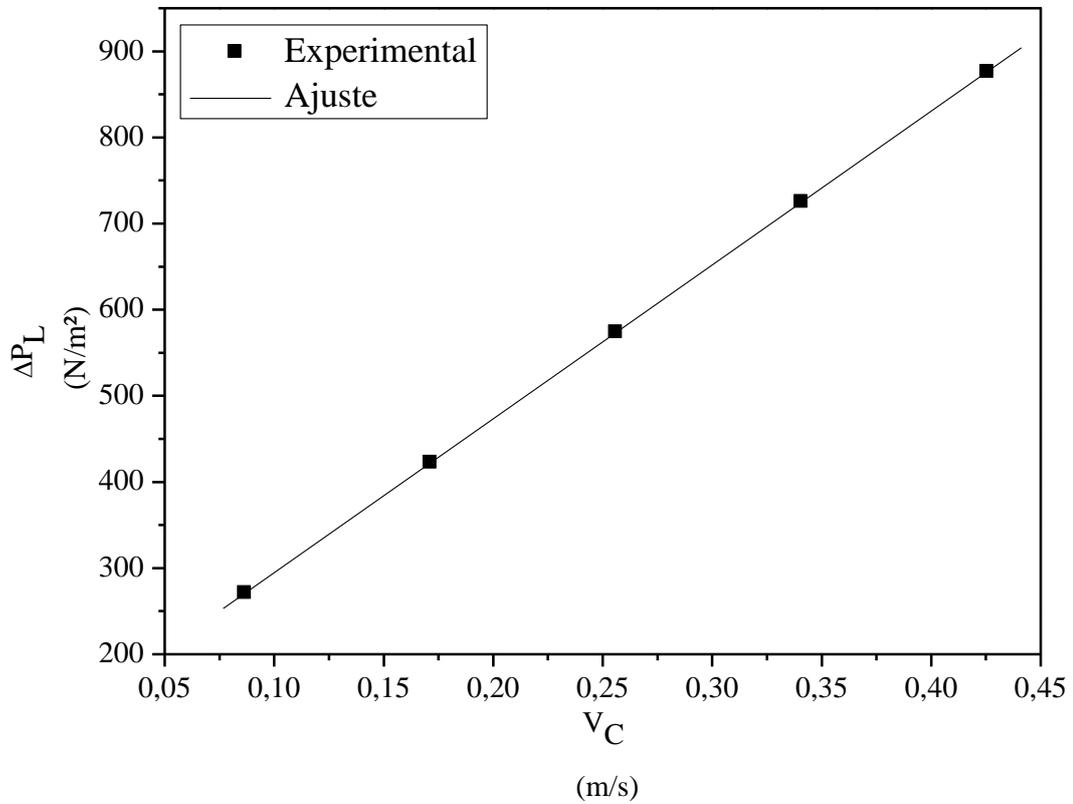


Figura 4.17: Comportamento da variação de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza.

Com base nos valores obtidos da Figura 4.17 pode-se calcular a força de adesão que se encontra na Tabela 4.11.

Tabela 4.11: Características calculadas da torta.

σ_R (N/m ²)	K_I (N.s/m ³)	F_c [N]
118,22	1785,10	1,80

Sendo que σ_R representa a tensão de remoção da torta, K_I a resistência específica do filtro e F_c a força de adesão, calculando a mesma através da equação 3.1 e levando em consideração a área de filtração como 0,0152 m².

4.3.4 Poliacrilato e Polvilho

Com os valores de velocidade de limpeza (V_c) e fração de massa retida obtidos nos experimentos realizados com filtro de poliacrilato e polvilho, foi possível desenvolver a Figura 4.18 que representa um gráfico do comportamento de V_c em função dos valores de γ . Na Tabela 4.12 são apresentados os valores dos coeficientes linear e angular e o R^2 desta regressão linear.

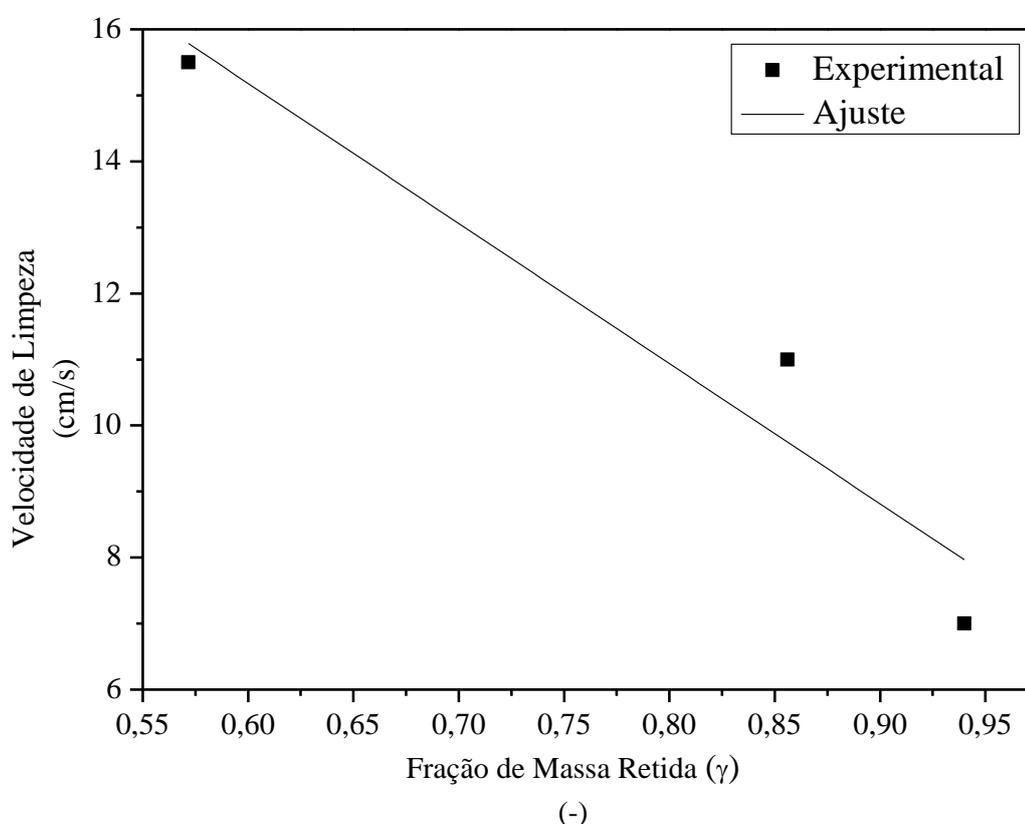


Figura 4.18: Comportamento da Velocidade de Limpeza em função da fração de massa retida

Os valores do desvio das frações de massa retida, respectivamente, em relação às limpezas de 7, 11 e 15,5 são 0,006731; 0,038256 e 0,007163.

Tabela 4.12: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.18.

R^2	A	B
0,9287	- 21,225	27,918

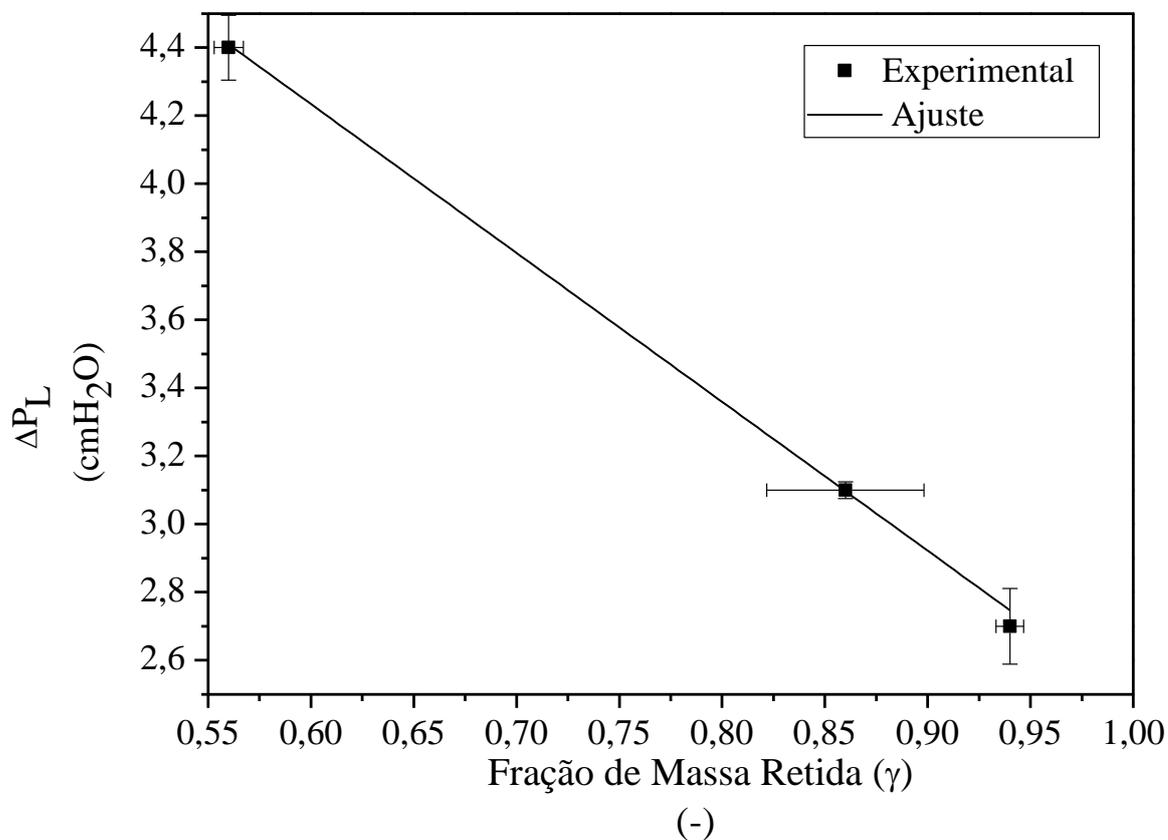


Figura 4.19: Comportamento da variação de pressão da torta em função da fração de massa retida.

A Figura 4.19 apresenta a regressão linear dos dados de Fração de massa retida por variação de pressão na torta. E a Tabela 4.13 mostra os coeficientes dados por essa regressão.

Tabela 4.13: Parâmetros da Equação e coeficiente de correlação do gráfico da figura 4.19.

R ²	A	B
0,999	- 4,604	95,880

Conforme o método de Seville *et al.* (1989) fez-se a interpolação dos pontos dos gráficos dados pelas Figuras 4.18 e 4.19 e foi possível obter um gráfico de V_c e ΔP_L , representado pela Figura 4.20, possibilitando o cálculo da força de adesão entre o polvilho e o acrílico.

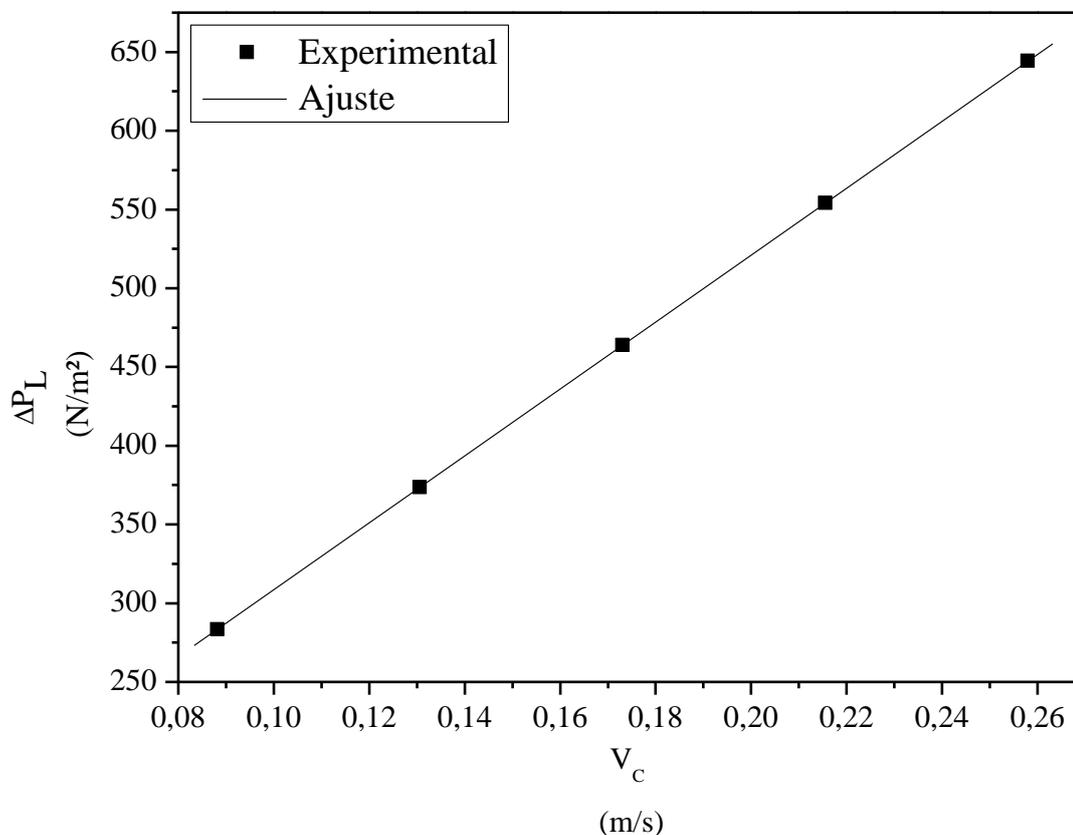


Figura 4.20 : Comportamento da variação de pressão na limpeza em função da velocidade de limpeza.

Com base nos valores obtidos da Figura 4.20 pode-se calcular a força de adesão que se encontra na Tabela 4.14.

Tabela 4.14: Características calculadas da torta.

σ_R (N/m ²)	K_I (N.s/m ³)	F_c [N]
95,88	2126,8	1,45

Sabendo que a área de filtração é de 0,0152 m², σ_R representa a tensão de remoção da torta, K_I a resistência específica do filtro e F_c a força de adesão, calculando a mesma através da equação 3.1.

Fez-se o cálculo da força de adesão usando outras metodologias com o intuito de comparação.

4.4 OUTRAS METODOLOGIAS PARA O CÁLCULO DA FORÇA DE ADESÃO

Com o emprego dos resultados obtidos pela caracterização dos materiais particulados, os testes de filtração na linha de pesquisa no laboratório de gás sólido da Universidade Federal de Uberlândia – UFU e aplicando as Equações 2.5 e 2.7, ambas encontradas no Capítulo 2 no presente trabalho, calculou-se a espessura e porosidade da torta. Vale ressaltar que se fez necessário o cálculo da porosidade uma vez que a tensão de ruptura do aglomerado é diretamente ligada a essa característica da torta, conforme já demonstrado, também, no capítulo 2.

A porosidade depende de muitas particularidades do pó com o qual se trabalha, além do tempo de filtração e variação de pressão do filtro. Ito (2002) através da Equação de Ergun comprova a ideia que a porosidade da torta diminui com o aumento da velocidade superficial.

Em seu trabalho Aguiar *et al.* (1996) chegaram à conclusão que o valor de porosidade, encontrada através de cálculos da literatura, é dependente do diâmetro da partícula de forma inversamente proporcional, ou seja, quando se aumenta o diâmetro a porosidade diminui e vice-versa.

4.4.1 Rumpf

Como foi mostrado no Capítulo 2 a Equação 2.17 foi desenvolvida com o intuito de calcular a tensão de ruptura do aglomerado, uma vez que o produto da multiplicação da tensão de ruptura e da área de filtração é à força de adesão.

Arouca (2014) adotou como valor da distância de separação efetiva $a = 1,7 \times 10^{-9}$ m tanto para a rocha fosfática quanto para o polvilho, inspirada no trabalho de Faustino (2010) onde o mesmo calculou inúmeros valores da distância de separação efetiva relacionadas com o diâmetro de partícula. Para o valor da constante de Hamaker (H) utilizou-se 8×10^{-20} J para a rocha fosfática e $5,2 \times 10^{-20}$ J para o polvilho doce, conforme Felicetti (2008).

Os valores encontrados para a força de adesão dos materiais estudados por a Equação de Rumpf são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Força de adesão dada pela Equação de Rumpf.

Materiais	Força de adesão (N)
Rocha fosfática e polipropileno	1,36
Rocha fosfática e poliacrilato	1,60
Polvilho e polipropileno	0,64
Polvilho e poliacrilato	0,57

Pode-se observar que os valores de força de adesão encontrados para a rocha fosfática foram maiores do que o polvilho, além de que no filtro de polipropileno as forças de adesão encontradas foram maiores. Isso pode ser explicado pela diferença da forma do material pulverulento, ou seja, o polvilho é mais esférico em relação à rocha fosfática em que a mesma possui irregularidades no formato e quanto aos tecidos Arouca (2014) explica as diferenças dos valores devido à maior abertura superficial e permeabilidade do poliacrilato.

Calculou-se, também, a força de adesão utilizando a metodologia de Kendall *et al* para que pudesse comparar os resultados com diferentes equações na literatura.

4.4.2 Kendall *et al.* (1986)

Para o cálculo da força de adesão utilizando a Equação de Kendall *et al.* (1986), já citada neste trabalho (Equação 2.19), utilizou-se como valores de distância de separação efetiva e constante de Hamaker (H) os mesmos de Rumpf. Ou seja, adotou como valor da distância de separação efetiva $a = 1,7 \times 10^{-9}$ m dada por Faustino (2010) e constante de Hamaker (H) utilizou-se 8×10^{-20} J para a rocha fosfática e $5,2 \times 10^{-20}$ J para o polvilho doce, conforme Felicetti (2008). Na Tabela 4.16 são mostrados os valores calculados de força de adesão para os materiais estudados nesse trabalho utilizando a Equação 2.19.

Tabela 4.16: Força de adesão dada pela Equação de Kendall *et al.*

Materiais	Força de adesão (N)
Rocha fosfática e polipropileno	1,78
Rocha fosfática e Acrílico	1,99
Polvilho e polipropileno	0,30
Polvilho e Acrílico	0,23

Conforme já citado na sessão anterior, os valores de força de adesão encontrados para a rocha fosfática foram maiores em relação ao polvilho e a explicação de tal fenômeno pode ser dada através da diferença do formato das partículas dos mesmos.

4.5 COMPARAÇÕES ENTRE AS METODOLOGIAS

Na Tabela 4.17 são apresentados os valores de Força e adesão calculados por os três métodos deste trabalho: Seville, Rumpf e Kendall *et al.*

Tabela 4.17: Força de adesão por Seville, Rumpf, Kendall *et al.*

Materiais	Força de adesão (N) por Seville.	Força de adesão (N) por Rumpf.	Força de adesão (N) por Kendall <i>et al.</i>
Rocha fosfática e polipropileno	1,82	1,36 (+/- 0,018)	1,78 (+/- 0,025)
Rocha fosfática e poliacrilato	2,14	1,60 (+/- 0,035)	1,99 (+/- 0,013)
Polvilho e polipropileno	1,80	0,64 (+/- 0,031)	0,30 (+/- 0,017)
Polvilho e poliacrilato	1,45	0,57 (+/- 0,019)	0,23 (+/- 0,027)

É possível observar que os valores encontrados com a rocha fosfática ficaram mais próximos pelos três métodos em relação aos valores encontrados pelo polvilho onde os mesmos tiveram uma diferença maior quando calculados pelo método gráfico de Seville e as equações de Kendall *et al* e Rumpf essa divergência pode ser explicada devido aos valores adotados nos parâmetros das equações 2.17 e 2.19. Já que o maior problema encontrado para quantificar a força de adesão através destas equações se dá pela dificuldade de determinar a distância de separação efetiva entre as partículas (AROUCA, 2010). Barros (2010) além de calcular a força de adesão por Seville, também utilizou dos valores desta força e calculou a distância de separação efetiva para cada material pulverulento em que estudou.

Coury e Aguiar (1983) decidiram testar a aplicabilidade da Equação proposta por Rumpf. (1962) para a remoção de tortas de filtração de gases e verificaram que apesar de se tratar de um sistema bastante distante do ideal, onde as partículas são esféricas e com diâmetro uniforme, esta Equação pode ser utilizada no desenvolvimento de técnicas de limpeza de filtros de tecido. Estes autores consideraram que as forças de Van der Waals eram

as únicas relevantes, encontrando resultados semelhantes aos resultados experimentais estimados por Seville et al. (1989). Desta forma, utilizou-se a teoria de Rumpf (1962) para analisar os resultados experimentais obtidos para a força de adesão por unidade de área dos materiais analisados.

É importante ressaltar que quanto mais próximas estão às partículas umas das outras, mais a torta estará compactada e conseqüentemente será necessária uma força maior para remoção dessa torta, portanto a distância de separação efetiva entre as partículas é uma grandeza que determina o grau de compressibilidade da torta. (BARROS, 2010).

Seguindo esta metodologia a Tabela 4.18 mostra os valores de distância de separação efetiva para a rocha fosfática e o polvilho quando em contato com o Propileno e poliacrilato utilizando os dados de força de adesão calculados pelo método gráfico, ou seja, Seville.

Tabela 4.18: Distância de separação efetiva.

Materiais	Distância de separação efetiva por
	Rumpf (m)
Rocha fosfática e polipropileno	$1,47 \times 10^{-9}$
Rocha fosfática e poliacrilato	$1,47 \times 10^{-9}$
Polvilho e polipropileno	$1,01 \times 10^{-9}$
Polvilho e poliacrilato	$1,06 \times 10^{-9}$

Segundo Schubert (1981) a menor distância possível entre duas partículas esféricas lisas, seria de 4.10^{-10} m, e para partículas reais, propôs que estaria entre 4.10^{-10} e 4.10^{-8} m, com os resultados obtidos experimentalmente a distância efetiva para rocha fosfática e polvilho com os dois tipos de tecido foram coerentes e se enquadram nessa faixa dada pelo autor. Portanto, o valor de tensão de remoção obtido experimentalmente mostrou-se satisfatório.

4.6 COMPARAÇÕES COM RESULTADOS DA BIBLIOGRAFIA

Em sua pesquisa Cirqueira *et al.* (2017) investigou o desempenho dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso, através do estudo da eficiência de limpeza e da observação da regeneração dos tecidos. Constatou que o filtro de polipropileno apresentou maior permeação, maior resistência específica e maior eficiência de limpeza, comparada ao

filtro poliacrilato para as mesmas condições operacionais. Nesta pesquisa a resistência específica do poliacrilato foi maior que do propileno isso pode ser explicado pelas condições operacionais onde a variação de pressão neste trabalho foi considerada baixa (20 cmH₂O).

Felicetti (2008) verificou que o valor da força de adesão aumenta com o aumento do diâmetro médio das partículas, através dos resultados experimentais obtidos são possíveis comprovar essa premissa, uma vez que a força de adesão com a rocha fosfática foi maior nos dois tecidos em relação ao polvilho sendo que o diâmetro médio da rocha é significativamente maior que do polvilho.

Barros (2010), não fixou a variação de pressão da torta como neste trabalho, mas delimitou a massa de pó depositada no filtro (0,039; 0,055; 0,064; 0,071 e 0,088 g/cm²). Para a velocidade de filtração de 10 cm/s o autor encontrou uma força de adesão de 6,38 para a rocha fosfática e 5,55 N para o polvilho no filtro de polipropileno, no filtro de poliacrilato os resultados foram 3,81 para a rocha fosfática e 3,08 para o polvilho. Nunes (2017) estudou a força de adesão no filtro de poliacrilato e rocha fosfática, tendo trabalhado com vibração mecânica, no entanto para comparação existiu um teste sem a vibração encontrando uma força de adesão de 0,92 N com variação de pressão fixada em 100 cmH₂O. Rodrigues (2004), utilizando a velocidade de filtração 9 cm/s e variações de pressão de 300, 400 e 500 mmH₂O encontrou como força de adesão para o filtro de polipropileno e rocha fosfática 2,25 N. Arouca (2014) trabalhou também com força de adesão nos testes sem vibração mecânica a mesma encontrou como resultado do cálculo da força de adesão 0,25 N para o polvilho doce e 2,23 N para a rocha fosfática tendo como variação de pressão de 50 cmH₂O. As diferenças operacionais explicam as diferenças na força de adesão uma vez que ela depende, também, da pressão, fração de massa retida, diâmetro de partícula e outros quesitos, no entanto a tendência foi à mesma, ou seja, maior força de adesão no polipropileno como filtro e na rocha fosfática como pó.

Barros (2010) e Rodrigues (2004), também definiram o valor da distância de separação efetiva (a) com a Equação (2.17) de Rumpf. O primeiro calculou o valor de a para o polipropileno como $1,63 \times 10^{-9}$ m para a rocha fosfática e para o polvilho $0,89 \times 10^{-9}$ m e para o $1,91 \times 10^{-9}$ m para a rocha e $1,01 \times 10^{-9}$ m polvilho. Rodrigues (2004) com o filtro de polipropileno e a rocha fosfática encontrou como distância de separação efetiva o valor de $2,25 \times 10^{-9}$ m. A distância de separação efetiva é diretamente ligada à porosidade e consequentemente dependente da vazão mássica de pó, viscosidade de gás, velocidade de filtração, diâmetro e densidade da partícula, área do meio filtrante logo é relativa às condições

operacionais, no entanto é possível observar que os dados calculados neste trabalho para o valor de a tem a mesma predisposição dos autores ou seja a é maior para a rocha fosfática.

Felicetti (2008), assim como muitos trabalhos recentes utilizou da técnica centrífuga para o cálculo da força de adesão. Quando aplicada a força centrífuga de compressão de 1000 RPM em partículas com diâmetro médio de com $26,15 \mu\text{m}$ a força de adesão encontrada foi de $1,29 \text{ N}$ e $a = 1,15 \times 10^{-9}$ para a rocha fosfática. No entanto mudando a velocidade centrífuga de compressão para 2000 RPM em partículas com diâmetro médio de com $27,15 \mu\text{m}$ a força de adesão encontrada foi de $1,84 \text{ N}$ e $a = 9,98 \times 10^{-10}$ aumentando mais ainda a compressão para 10000 RPM e partículas com diâmetro médio de $26,09 \mu\text{m}$ a força de adesão encontrada foi de $5,03 \text{ N}$ e $a = 5,03 \times 10^{-10}$ comprovando que em diferentes condições operacionais existem valores diferentes de força de adesão e distância de separação efetiva.

Este capítulo apresentou os resultados obtidos experimentalmente e cálculos acerca da força de adesão e a comparação com a bibliografia encontrada.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões acerca da força de adesão e parâmetros diretamente ligados a mesma. Resultados esses obtidos na filtração de rocha fosfática e polvilho com os filtros de polipropileno e poliacrilato com variação de pressão na torta de 20 cmH₂O.

(i) Utilizando valores pequenos de variação de pressão na torta é possível calcular a porosidade e a força de adesão na filtração.

(ii) Os três métodos de cálculo de força de adesão forneceram valores consistentes com a realidade, dentro de suas limitações, devido a dificuldade em quantificar a distância de separação efetiva (a) para os métodos de Rumpf e Kendall *et al*, enquanto que para o método de Seville não se teve nenhum problema por ser um método gráfico e utilizando de resultados experimentais para a determinação da força de adesão.

(iii) Através do método de Seville se obteve a maior força de adesão para os quatro testes (combinação de rocha fosfática e polvilho com filtros de poliacrilato e polipropileno). Com a rocha fosfática os valores encontrados foram mais próximos quando comparados ao polvilho.

(iv) A tendência do comportamento dos valores de força de adesão e distância de separação efetiva seguiram os resultados encontrados na literatura, as diferenças entre os mesmos existiram uma vez que as condições operacionais não eram iguais. No entanto a força de adesão e a foram maiores para os filtros de polipropileno e rocha fosfática.

(v) Os cálculos da distância efetiva de separação quando utilizando os resultados de força de adesão pelo método de Seville e a Equação 2.17 de Rumpf estão compreendidos na faixa de $4 \cdot 10^{-10}$ e $4 \cdot 10^{-8}$ m proposta por Schubert (1981), comprovando que a tensão de remoção obtida experimentalmente foi coerente, assim como os valores encontrados na literatura para o parâmetro a quando utilizou esta Equação.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- (i) Obter a força de adesão utilizando filtros de celulose, uma vez que estes vêm tendo bastante destaque na área de filtração e estudos do mesmo são necessários.
- (ii) Utilizar pressões diferentes e estudar o quanto a diferença de pressão afeta no valor da força de adesão e conseqüentemente em a .
- (iii) Estudar as características das tortas por microscopia. Um exemplo seria a porosidade utilizando o método direto, ou seja, de pré – endurecimento da torta (AGUIAR, 1991).
- (iv) Desenvolver no laboratório a técnica centrífuga para o cálculo da força de adesão, sendo esta técnica muito usual e experimental, muito difundida na literatura recente. Felicitii (2008) explica que a vantagem do uso desta técnica se dá pelo poder de determinar a força de adesão de um grupo grande de partículas reais de formas regulares e irregulares em superfícies lisas e rugosas. Essa técnica foi desenvolvida por Böhme *et al.* (1962) e Krupp (1967) para determinar a força de adesão de partículas esféricas e através de diversos estudos vem se aperfeiçoando (FELLICETTI, 2008; FAUSTINO, 2010).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M. L. **Filtração de ar em filtros de tecido.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1991.
- AGUIAR, M. L. **Filtração de gases em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada.** (Tese de Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- AGUIAR, M. L. ; COURY, José Renato ; COSTA, L. F. . **Verificação da compressão de tortas de filtração de gases, por meio de medidas diretas e indiretas da porosidade.** In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS - ENEMP, 23. Maringá, 1996.
- ALMEIDA, Luiz Otávio Afonso de - Eng^o de Minas - FOSFÉRTIL - **Complexos de Mineração de Tapira (CMT) Dadas Gerais** - Fev. 2001 - Tapira / MG - Bem Mineral / Reservas - BMB 2001.
- AMARAL, A. J. R. **Geologia do fosfato. Principais depósitos minerais do Brasil.** In: SCHOBENHAUS, C., QUEIROZ, E. T., COELHO, C. E. S. (Ed.). Brasília: DNPM/CPRM, 1997. v. 14, Parte C, cap. 1. 634 p.
- AROUCA, A. M. M. **Efeito da Vibração Mecânica Perpendicular na formação e remoção de tortas de filtração de aerossol.** (Tese de Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia- MG, 2014.
- AZEVEDO, S. G. R. **Estudo da influência do formato das partículas na operação de filtração de gases.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
- BAKONYI, S. M. C.; OLIVEIRA, I. M. D.; MARTINS, L. C.; BRAGA, A. L. F. **Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR.** Revista de Saúde Pública, São Paulo, v. 38, p. 695-700, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102004000500012>
- BARBOSA, M.C.; **Uso de filtro de mangas para tratamento de gases resultantes da combustão de bagaço de cana.** Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica - UNESP - Bauru- SP, 2014.
- BARROS, P.M. **Estudo da Força Adesão de tortas de Filtração de gases em diferentes condições operacionais.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. UFSCar - São Carlos, 2010.
- BÖHME, G., KRUPP, H., RABENHORST, H. and SANDSTEDT G., "Adhesion

- measurements involving small particles."** Trans. Int. Chem. Eng. v.40, p.2522-59, 1962.
- BRAGA, A. *et al.* **Poluição atmosférica e saúde pública.** REVISTA USP, São Paulo, n.51, p. 58-71, setembro/novembro 2001.
<https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i51p58-71>
- BRAGA, A.L.F. *et al.* **Associação entre poluição atmosférica e doenças respiratórias e cardiovasculares na cidade de Itabira, Minas Gerais, Brasil.** Cad. Saúde Pública, Mineração e efeitos adversos na saúde. Rio de Janeiro, 2007.
<https://doi.org/10.1590/S0102-311X2007001600017>
- CANÇADO, J.E.D. BRAGA, A., PEREIRA, L.A.A., ARBEX, M.A., SALDIVA, P.H.N., SANTOS, U.P. **Repercussões clínicas da exposição à poluição atmosférica. Jornal brasileiro de pneumologia.** v.32 cap.2. São Paulo Maio, 2006.
<https://doi.org/10.1590/S1806-37132006000800003>
- CAO, C. YU-YING, C., ZHOU,Z. LI, F.M., HUANG, Q.L. **The role of adhesion force in the bouncing height of pesticide nanoparticles on the rice (*Oryza sativa*) leaf surface.** Journal of Molecular Liquids 272, p 92-96. China, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.09.086>
- CAVASSENO, V.; **"Industrial Air Pollution Engineering"**. [S.l.: s.n.], 1980.
- CIRQUEIRA, S. S. R. **Avaliação do desempenho dos ciclos de filtração e regeneração dos meios filtrantes com limpeza por pulso de ar reverso.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- CIRQUEIRA, S.S.R; TANABE, E.H. AGUIAR, M.L. **Evaluation of operating conditions during the pulse jet cleaning filtration using different surface treated fibrous filters. Process Safety and Environmental Protection.** Volume 105, p. 69-78. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.010>
- COURY, J.R. & AGUIAR, M.L. **Aspectos Estruturais de Aglomerados de partículas finas.** IN Tópicos Especiais em Sistemas Particulados. Ed. J. T. Freire e A.M. Silveira: p. 245-281. - Engenharia Química - Universidade Federal de São Carlos, 1983.
- CEREDA, M. P., NUNES, O. L. G. S. **Definição de parâmetros de fermentação e secagem para industrialização do polvilho azedo.** Botucatu: Departamento de Tecnologia dos Produtos Agropecuários, UNESP, 1989. 80 p
- CERON, L. P; EINLOFT, S.; LIGABUE, R. **Controle da filtração de particulados em não tecidos por perda de pressão e fluxo de ar.** Revista Química Têxtil, volume 108, p. 68 - 74, 2012

DAVIS, W. T. **Air pollution engineering manual**. cap.3, p. 99 - 116, 2 ed., 2000.

DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle da poluição ambiental**. São Paulo: CETESB. 1992.

ERGUN, S. **Fluid flow through packed columns**. Chemical Engineering Progress, v. 48, n° 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) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

FAUSTINO, P.B. **Determinação Experimental da força de adesão entre partículas e metais filtrantes constituídos de celulose**. Dissertação de Mestrado UFSCAR - São Carlos - SP, 2010.

FELICETTI, M.A. **Investigação da influencia do tamanho das partículas de materiais pulverulentos sobre a força de adesão em diferentes substratos aplicando a técnica centrifuga**. Tese de Doutorado. UFSCar - São Carlos, SP, 2008.

GAC, J.M., JACKIEWICZ, A. **Consecutive filtration of solid particles and droplets in fibrous filters**. *Separation and Purification Technology*. Vol. 170, p. 234-240, Out. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.06.057>

GEANKOPLIS, C. J. **"Transport processes and separation process principles"**. 4th ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.

HAMAKER, H.C. The London- **Van der Waals Attraction Between Spherical Particles**. *Physical* IV, n° 10, 15 p., 1937.
[https://doi.org/10.1016/S0031-8914\(37\)80203-7](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(37)80203-7)

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

KENDALL, K. ALFORD, N. McN; BIRCHAL, J.D. **The Strength of Green Bodies**. *Br. Cerm. Proc*, v. 37, 1986.

KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. **Dust Cake Detachment from Gas Filters**. *Powder Technology*, v. 141, p. 1811, 1996.
[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)03033-6](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03033-6)

KRUPP, H., **"Particle adhesion theory and experiment."** *Adv Coll. Interface Science*, v.1, n.2, p.111-239, 1967. [https://doi.org/10.1016/0001-8686\(67\)80004-6](https://doi.org/10.1016/0001-8686(67)80004-6)

- LIU, A., MA, Y., GUNAWARDENA, J.M.A., EGODAWATTA, P., AYOKO, G.A., GOONETILLEKE, A. **Heavy metals transport pathways: The importance of atmospheric pollution contributing to stormwater pollution.** *Ecotoxicology and Environmental Safety* vol. 164, p. 696-703, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.072>
- LORA, Electo Eduardo Silva . **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciencia, 2002. v. 1. 481 p.
- MAEDA, K. C.; CEREDA, M. P. **Avaliação de duas metodologias de expansão ao forno do polvilho azedo.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, v. 21, n. 2, p. 139-143, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612001000200003>
- MAO, N. **Engineering design of high-performance filter fabrics.** *Engineering of High-Performance Textiles.* The Textile Institute Book Series. p. 435-488, 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101273-4.00018-4>
- MATTESON, M.J.; ORR, C. **Filtration: Principles and practices.** 2 edition, New York, USA: Marcel Dekker Inc., 1986. V. 27 (Chemical Industries).
- 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.
- NI, L. A.; YU, A. B.; LU, G. Q.; HOLMES, T. **Simulation of the cake formation and growth in cake filtration.** *Minerals Engineering* 19, p. 1084 - 1097, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.03.012>
- NUNES, D. ALVAREZ, F.F.G., CERON, L.P., PARREIRA, F.M.C. **Estudo de formação e remoção de tortas de filtração em não tecidos.** *Revista Meio filtrante* . São Paulo. 2012. v. 58. p. 22-27. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=13764&link=noticias>>.
- NUNES, D. M. **Estudo sobre o efeito de vibrações axiais sobre a formação e remoção de tortas de filtração gás-sólidos.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, UFU, 2017.
- PERRY, RH. GREEN, D.W. **Perry's chemical engineering handbook.** 6° ed., New York, McGraw-Hill, 1984.
- PETEAN, P. G. C., & AGUIAR, M. L. **Determining the adhesion force between particles and rough surfaces.** *Powder Technology*, vol. 274, p. 67-76, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.047>
- PODCZECK F., NEWTON . J.M., JAMES M.B., **The influence of constant and changing**

- relative humidity of the air on the autoadhesion force between pharmaceutical powder particles.** Int. J. Pharm. Vol 145, p. 221-229, 1996.
[https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(96\)04774-6](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(96)04774-6)
- RAJAGOPALAN, S., Al-Kindi, S.G., Brook, R.D. **Air Pollution and Cardiovascular Disease: JACC State-of-the-Art Review.** Journal of the American College of Cardiology. Vol. 72, p. 2054-2070, Oct. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.07.099>
- RICCO JUNIOR, E. **Lavador de gás tipo Venturi. Meio Filtrante.** ano V, n. 25, mar./abr. 2007. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=285>>. Acesso em: 12 jul. 2017.
- ROCHA, S.M.S. **"Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta de limpeza de gases em filtro de mangas"**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG. 168p. 2010.
- RODRIGUES, A. C. M. **Estudo da Formação e Remoção de Tortas de Filtração de Gases em Filtros de Tecidos de Polipolipropileno e de Algodão.** (Tese de Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.
- RODRIGUES, K. B. **Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes.** (Dissertação de Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- 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 na Agglomerates.** In: KNEPPER, W.A. Agglomeration Interscienc, New York, p.379-414, 1962.
- RUSH, M. N. et al. **Glass-particle adhesion-force-distribution on clean (laboratory) and contaminated (outdoor) surfaces.** Los Alamos, NM, 87545, United States. Journal of Aerosol Science, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.06.002>
- SALAZAR-BANDA, G.R., FELICETTI M.A., GONÇALVES J.A.S., COURY, J.R., AGUIAR M.L. **Determination of the adhesion force between particles and a flat surface, using the centrifuge technique.** Powder Technol. Vol. 173, p.107-117, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.12.011>
- SALDIVA PHN, Braga ALF, Pereira LAA. **Health effects of ambient levels of air pollution.** In: Hogan DJ, Berquó E, Costa HSM, editors. Population and environment in

Brazil: Rio + 10. Campinas: Comissão Nacional de População e Desenvolvimento/Associação Brasileira de Estudos Populacionais/Núcleo de Estudos de População, Universidade Estadual de Campinas; 2002. p. 207-23.

SANCHES, J. R. et al. **Comparative study of different fabrics in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes.** *Filtration and Separation*, p. 593-598, July/August, 1997.
[https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(97\)90449-3](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)90449-3)

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.

SCHIRMER, W.N.; CORTEZ, A.M.; KOZAK, P.A.. **Ventilação industrial: uma ferramenta na gestão de resíduos atmosféricos em indústrias moveleiras - estudo de caso.** *Revista de Ciências Ambientais*, 2(1):15-28. 2008.

SCHUBERT, H. **Principles of Agglomeration.** *International Chemical Engineering*, v.21, n°3, p. 363-371, 1981.

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

SILVA NETO, O.G. **Estudo da Porosidade de Tortas em Filtros de Manga Operando na Filtração de Gases.** (Tese de Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

SOUZA, F. M. N.; SILVA, C. E.; AGUIAR, M. L. **A análise de risco como instrumento para sistemas de gestão ambiental.** *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v.3, n°1, p-18- 41, Aquidabã, 2012.

SOUZA, A. E.; FONSECA, D.S.; **Economia Mineral do Brasil - 2009: fosfato. Agência Nacional de Mineração.** Cáp. 7. p. 546-568. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>>.

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

TANABE, Eduardo Hiromitsu. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a altas pressões.** 2011. 167 f. Tese (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

TIENI, E. F. Filtração de gases: **Estudo do fenômeno da limpeza por blocos** (Dissertação

de Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

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

WALSH, D. C. **Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load.** Filtration and Separation, June 1996, p. 501 - 506.
[https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(97\)84316-9](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(97)84316-9)

WANG, Q., Liu, M., Li, Y., Liu, Y.K., Li, S.W., Ge, R.R., 2016. **Dry and wet deposition of polycyclic aromatic hydrocarbons and comparison with typical media in urban system of Shanghai, China.** Atmos. Environ. 144, 175-181.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.079>

ZHENG, N. et al. **Adhesion force measured by atomic force microscopy for direct carbon fiber-epoxy interfacial characterization.** Materials and Design 145, p. 218-225, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.02.060>

ANEXO A

O anexo A apresenta a carta psicrométrica utilizada para a leitura da umidade relativa dentro da caixa de filtração.

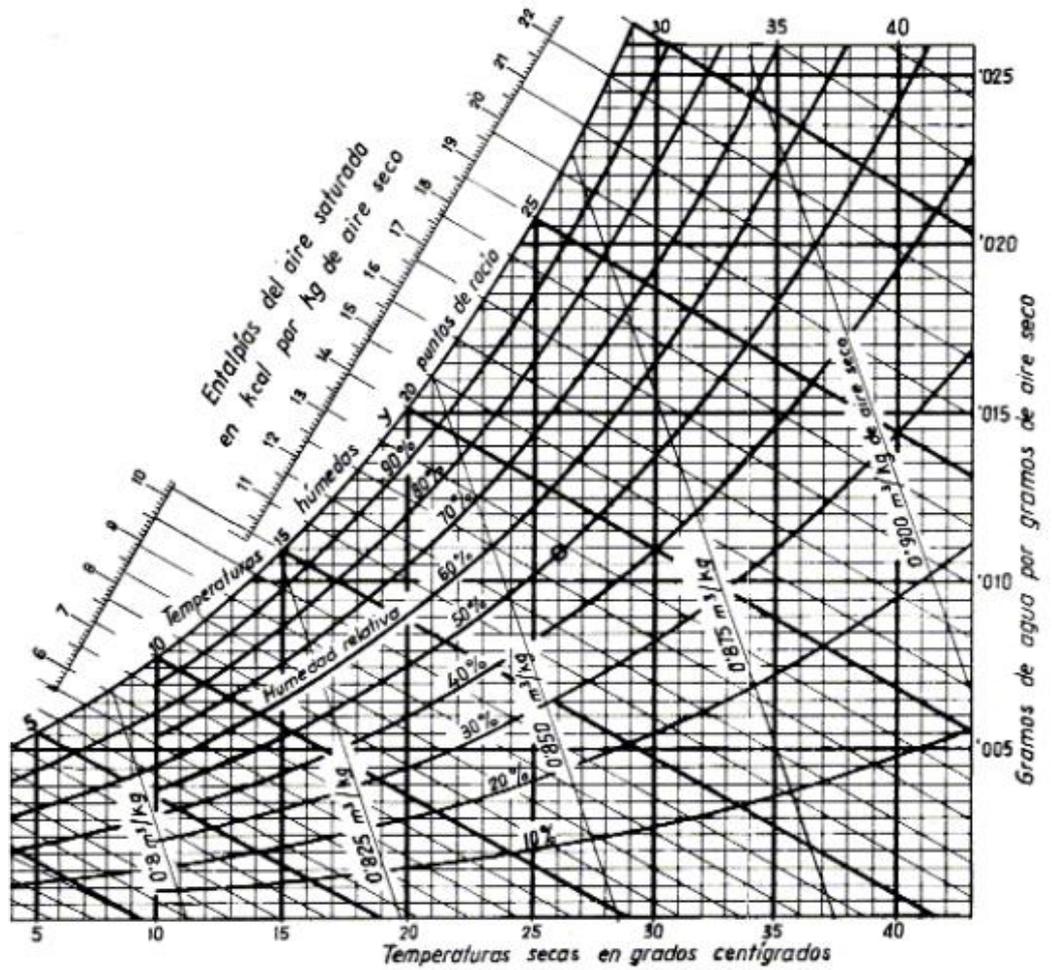


FIGURA: A1 - Carta Psicrométrica temperatura variando de 4 a 43°C (AROUCA, 2014).