

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

***COMPORTAMENTO DA FILTRAÇÃO DE GASES EM MEIOS FILTRANTES DE
CELULOSE***

VANESSA MOREIRA OSÓRIO

SÃO CARLOS – SP

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

***COMPORTAMENTO DA FILTRAÇÃO DE GASES EM MEIOS FILTRANTES DE
CELULOSE***

VANESSA MOREIRA OSÓRIO

*EXAME DE QUALIFICAÇÃO APRESENTADO AO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA QUÍMICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
CONTROLE AMBIENTAL.*

ORIENTADORA: PROF. DRA. MÔNICA LOPES AGUIAR

SÃO CARLOS – SP

2005

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

O83cf

Osório, Vanessa Moreira.

Comportamento da filtração de gases em meios filtrantes de celulose / Aline Vanessa Moreira Osório. -- São Carlos : UFSCar, 2006.

117 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2006.

1. Filtração de gases. 2. Meios filtrantes de celulose. 3. Perda de carga residual. 4. Porosidade. I. Título.

CDD: 660.284245 (20^a)

“Seja qual for o grau a que chegamos,
o que importa é prosseguir
decididamente.” (Filp, 3-16)

Aos meus pais, José Geraldo e Margarida que sempre
me apoiaram em minhas decisões...

AGRADECIMENTOS

Obrigado Senhor, pela presença constante ao meu lado. Pela força que me destes para alcançar mais esta vitória.

Aos meus irmãos, Vivian e Júnior, e meu cunhado Marcelo meus amigos.

Ao meu namorado Douglas, pelo incentivo, apoio e amor.

As minhas amigas de república Adriana, Cris, Lú, Aninha, Iara, Patrícia, Karla, Lidi, Chris, Nickeli, por toda amizade e companheirismo, por estarem presente nos momentos que mais precisei.

Ao meu namorado Douglas, pelo incentivo apoio e amor.

Aos meus amigos de Viçosa, que mesmo distante sempre se fizeram presente.

As crianças, Ana Márcia, João Pedro, Ismael, Lissandra, Clara e Livia que sempre trouxeram alegria ao meu coração pela simplicidade de criança. Em especial a Ana Luiza, que convivi durante este tempo em São Carlos.

Aos meus colegas de laboratório Karina, Érica, Simone, Vádila, Marcos Felliceti por toda ajuda científica e pelos momentos de descontração. A minha aluna de iniciação Débora pela amizade e aprendizado que tivemos juntas.

A Karina Arruda pela amizade.

Ao Padre José Antonio e a Paróquia Nossa Senhora do Carmo pela acolhida.

A Professora Dr. Mônica Lopes Aguiar, por sua orientação, e pelo seu comprometimento no meu processo de formação científica.

Ao Oscar por toda ajuda no equipamento.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

INDICE

AGRADECIMENTOS.....	ii
INDICE	ii
LISTA DE FIGURAS.....	v
SIMBOLOGIA.....	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
1- INTRODUÇÃO	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 – Filtração	3
2.2- Técnicas de limpeza de filtros	4
2.3 - Meios filtrantes	4
2.3.1- Meios filtrantes de fibras de celulose	5
2.3.1.1 – Filtros tipo Cartucho	7
2.3.1.2- Etapas de fabricação dos meios filtrantes de fibras de celulose	8
2.4 – Verificação dos filtros.....	11
2.5 – Permeabilidade.....	13
2.6 – Queda de Pressão no Filtro	15
2.6.1- Queda de pressão através do meio filtrante	17
2.6.2 - Queda de pressão através da torta.....	18
2.7 – Limite da Lei de Stokes para k_2	19
2.7.1 - Equação de Kozeny – Carmam para calcular R	20
2.7.2 – Valor experimental da resistência específica da torta (k_2).....	21
2.8 – Força de Arraste / Arraste Efetivo	21
2.9 – Porosidade e Equação de Ergun.....	23
3- MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 – Equipamentos.....	26
3.1.1- Equipamentos Usados para Filtração e Limpeza.....	26
3.1.1.1 – Caixa de filtração	27

3.1.1.2 – Alimentador de pó.....	28
3.1.1.3 – Desumidificadores.....	29
3.1.1.4 – Sistema de Controle, Medidores de Pressão, de Vazão	29
3.1.1.5 – Demais Periféricos	30
3.2 – Materiais.....	30
3.2.1– Meios Filtrantes.....	30
3.2.2 – Material Pulverulento.....	31
3.3 - Realização dos ensaios.....	32
3.3.1 – Filtração.....	33
3.3.2 – Remoção da torta	34
3.4 – Cálculos.....	35
3.4.1 – Cálculo da vazão de alimentação	35
3.4.2 – Cálculo de porosidade.....	35
3.4.3 - Cálculo da Resistência Especifica da torta (K_2)	35
4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 – Caracterização dos meios filtrantes.....	37
4.2- Ciclos de filtração e limpeza.....	38
4.3 - Investigação para o meio filtrante Rad Mais e Rad Plus na velocidade de filtração de 10 cm/s	39
1ª Parte Experimental.....	39
4.3.1 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Mais	39
4.3.2 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Plus	46
4.3.3 – Comparação do comportamento do meio filtrante Rad Plus e Rad Mais com V_f de 10 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s.....	53
4.4 - Investigação para o meio filtrante Rad Mais e Rad Plus para a velocidade de filtração de 5 cm/s.....	60
2ª Parte Experimental.....	60
4.4.1 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Mais	60
4.4.2 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Plus	67

4.4.3 – Comparação do comportamento do meio filtrante Rad Plus e Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	74
5- CONCLUSÕES	80
6- SUGESTÕES DE TRABALHOS	82
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
APÊNDICE B	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Representação esquemática da formação de dendritos.....	6
Figura 2.2: (a) Formação de dendritos no interior do meio filtrante, (b) formação da torta de filtração na superfície do meio filtrante (Song, 2006).	7
Figura 2.3: Filtro cartucho com meio filtrante plissado.....	8
Figura 2.4: Observação microscópica do meio filtrante de celulose, (a) entrada de fluxo (50x) e (b) saída de fluxo (50x) (Catálogo Alhstrom Louveira).....	10
Figura 2.5: Observação microscópica do meio filtrante (a) fibras de celulose de Eucalyptus (1000x) e (b) fibras de celulose de Pinus (88x).	10
Figura 2.6: Ciclos de filtração ideais (Norma VDI3926, 2003).....	11
Figura 2.7: Ciclos de filtração reais (Norma VDI3926, 2003)	12
Figura 2.8: Ciclos de filtração reais, com comportamento de limpeza por blocos (peatchy cleaning) (Norma VDI3926, 2003).....	13
Figura 2.9: Queda de pressão como função da massa acumulada para o primeiro ciclo de filtração (Song, 2006).	16
Figura 2.10: Determinação do arraste efetivo nos estágios iniciais da filtração.....	23
Figura 3.1: Vista Geral do Equipamento de Filtração.....	27
Figura 3.3: Sistema de alimentação de pó.....	29
Figura 3.4: Variação da % acumulada em volume em função do diâmetro de partícula para o concentrado fosfático, obtido no Malvern Mastersizer Microplus.	32
Figura 4.1: Observação microscópica do meio filtrante Rad Mais, (a) entrada do fluxo (88x) e (b) saída do fluxo (88x).....	37
Figura 4.2: Observação microscópica do meio filtrante Rad Plus, (a) entrada do fluxo (88x) e (b) saída do fluxo (88x).....	38
Figura 4.3: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Mais, para V_f de 10 cm/s e V_l de 18 cm/s (a) e V_l de 13 cm/s (b).	40
Figura 4.4: Massa removida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para V_f de 10 cm/s e V_l de 13 cm/s e de 18 cm/s.	41

Figura 4.5: Massa retida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	42
Figura 4.6: Perda de carga residual versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.	43
Figura 4.7: Porosidade versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.	44
Figura 4.8: Resistência específica da torta versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.....	45
Figura 4.9: Eficiência de remoção versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.	46
Figura 4.10: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s, VI de 18 cm/s (a), e VI de 13 cm/s (b).....	47
Figura 4.11: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	48
Figura 4.12: Massa retida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	49
Figura 4.13: Perda de carga residual versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	50
Figura 4.14: Porosidade versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	51
Figura 4.15: Resistência específica da torta versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	52
Figura 4.16: Eficiência de remoção versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	53
Figura 4.17: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Plus e Rad Mais durante o primeiro ciclo de filtração.....	54
Figura 4.18: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	55
Figura 4.19: Massa retida versus número de ciclos para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	56

Figura 4.20: Perda de carga residual versus número de ciclos para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para Vf de 10 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	58
Figura 4.21: Eficiência de remoção versus número de ciclos para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para Vf de 10 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	59
Figura 4.22: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 18 cm/s (a) e Vl de 13 cm/s (b).	60
Figura 4.23: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	61
Figura 4.24: Massa retida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.	63
Figura 4.25: Perda de carga residual versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	64
Figura 4.26: Porosidade versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	65
Figura 4.27: Resistência específica da torta versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.	66
Figura 4.28: Eficiência de remoção versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	67
Figura 4.29: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 18 cm/s (a), Vl de 13 cm/s (b).....	68
Figura 4.30: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	69
Figura 4.31: Massa retida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.	70
Figura 4.32: Perda de carga residual versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	71
Figura 4.33: Porosidade versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	72
Figura 4.34: Resistência específica da torta versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.....	73

Figura 4.35: Eficiência de remoção versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	74
Figura 4.36: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	75
Figura 4.37: Massa retida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	76
Figura 4.38: Perda de Carga residual versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	77
Figura 4.39: Eficiência de remoção versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.....	79

SIMBOLOGIA

A = área de filtração [L^2]

C = fator de correção de Cunningham [-]

d_p = diâmetro de partícula [L]

ε = porosidade da torta [-]

k_1 = resistência específica do meio filtrante [ML^2t^{-2}]

k_2 = resistência específica da torta [t^{-1}]

k_{ck} = constante empírica [-]

L = espessura do meio filtrante [L]

L_c = espessura da torta [L]

M = massa de pó depositada [M]

ΔP_F = queda de pressão no filtro [$ML^{-1}t^{-2}$]

ΔP_C = queda de pressão na torta de pó [$ML^{-1}t^{-2}$]

ΔP_T = queda de pressão total [$ML^{-1}t^{-2}$]

Q = vazão mássica [Mt^{-1}]

S_E = arraste efetivo do filtro [ML^2t^{-1}]

S = arraste do filtro [ML^2t^{-1}]

t = tempo de filtração [t]

V_f = velocidade de filtração [Lt^{-1}]

V_l = velocidade de limpeza [Lt^{-1}]

W = massa de pó depositada por unidade de área [ML^{-2}]

W_R = massa residual de pó por unidade de área [ML^{-2}]

μ = viscosidade do fluido [$ML^{-1}t^{-1}$]

ρ = densidade do fluido [ML^{-3}]

ρ_p = densidade da partícula de pó [ML^{-3}]

α = coeficiente de resistência viscosa [L^{-2}]

RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar, através do processo de filtração e de remoção das tortas, o comportamento de dois meios filtrantes de fibras de celulose de diferentes permeabilidades. O material particulado utilizado foi o concentrado fosfático de densidade $2,99 \text{ g/cm}^3$ e diâmetro médio de partícula de $8,34 \text{ }\mu\text{m}$. O equipamento utilizado era constituído de um filtro circular, alimentador de pó com a vazão mássica e umidade controlada, um microcomputador e um sistema para controle e aquisição de dados. Os meios filtrantes utilizados foram de fibras de celulose, Rad Mais e Rad Plus, fornecidos pela Empresa Alhstrom Louveira. O trabalho foi realizado por uma seqüência sucessiva de filtração e de limpeza durante 100 ciclos de filtração, em meios filtrantes de celulose, sendo que o método de limpeza utilizado, para a remoção das tortas, foi o fluxo de ar reverso. No procedimento experimental de filtração foram utilizadas velocidades de filtração de 10 cm/s , para queda de pressão máxima de $200 \text{ mmH}_2\text{O}$, e de 5 cm/s , para queda de pressão de $100 \text{ mmH}_2\text{O}$. Para a remoção das tortas foram utilizadas duas velocidades de limpeza, de 18 cm/s e 13 cm/s . Os resultados mostraram que o meio filtrante Rad Mais, quando submetido à velocidade de filtração de 10 cm/s e velocidade de limpeza de 18 cm/s , obteve a melhor condição operacional, porque apresentou menor perda de carga residual para uma maior massa retida durante os 100 ciclos de filtração. Para as duas velocidades de filtração de 10 cm/s e 5 cm/s , o meio filtrante Rad Mais, mais poroso e mais permeável, a quantidade de massa de partículas removida foi maior quando comparado com o meio filtrante Rad Plus com V_l de 18 cm/s , porque a força de remoção para a V_l de 18 cm/s conseguiu remover as partículas retidas nas fibras. Já para a V_f de 5 cm/s , uma menor velocidade de limpeza, V_l de 13 cm/s foi suficiente para remover maior quantidade de partículas, quando comparada com o meio filtrante Rad Plus nas mesmas condições experimentais.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate, through filtration process and cake detachment, the behavior of two cellulose fiber filtering media with different air permeability values. The powder material used was phosphatic concentrated rock of density $2,99 \text{ g/cm}^3$ and its average volumetric diameter of $8,34 \text{ }\mu\text{m}$. The equipment used was constituted of a circular filter, powder feeder which controlled the massic flow and humidity by a microcomputer and a system for control and acquisition of data. The filtering media used were cellulose fibers, Rad More and Rad Plus, supplied by Alhstrom Louveira. The work was accomplished by a successive sequence of filtration and cleaning during 100 filtration cycles using cellulose filtering media. The technique employed for cake removal was reverse air flow. In the experimental procedure, filtration velocity of 10 cm/s was used for maximum pressure drop of $200 \text{ mmH}_2\text{O}$, and 5 cm/s for maximum pressure drop of $100 \text{ mmH}_2\text{O}$. Two cleaning velocity were employed for cake removal, 18 and 13 cm/s . The results showed that the filtering media Rad Plus, when submitted to filtration velocity of 10 cm/s and cleaning velocity of 18 cm/s , obtained the best operational condition, as it presented lower values of residual pressure drop for a larger mass retained during the 100 filtration cycles. For different filtration velocity, 10 and 5 cm/s , the filtering media Rad Plus, more porous and more permeable, the amount of particle mass removed was larger than for the filtering media Rad Plus applying cleaning velocity of 18 cm/s as the removal force for this cleaning velocity could remove the particles retained in the fibers. For filtration velocity of 5 cm/s , a lower cleaning velocity, 13 cm/s , was enough to remove larger amount of particles, when compared with the filtering media Rad Plus in the same experimental conditions.

1- INTRODUÇÃO

A filtração é uma importante operação utilizada na separação gás-sólido, pela passagem do fluido através de um meio poroso permeável (Dickenson, 1994). A filtração se dá inicialmente pela captura de partículas no interior do meio filtrante, denominado de filtração interna, onde ocorre a impregnação do meio filtrante e a formação de uma camada de material particulado denominada torta de filtração.

Os filtros são bastante empregados, pois, reduzem a emissão de material particulado na atmosfera. Os primeiros registros da utilização de filtros (Spurny, 1997) se deram no Império Romano na forma de purificação da água e do ar. Atualmente, os filtros têm sido bastante empregados nas indústrias para purificação do Gás Natural. Este gás possui diversas aplicações na indústria e no comércio. Nos últimos anos devido à substituição do álcool e da gasolina pelo Gás Natural sua utilização teve um grande aumento. Esta substituição tem sido bastante eficaz porque esse combustível reduz a emissão de resíduos de carbono, levando a um aumento da qualidade do ar e da vida útil do motor.

Os filtros utilizados para reter os contaminantes presentes no Gás Natural são fabricados na forma de cilindros, chamados de cartucho e utilizam meios filtrantes de fibras de celulose que são confeccionados na forma plissada. Os meios filtrantes são produzidos com celulose derivada de Pinus, constituídos de fibras longas o que torna o meio filtrante mais resistente e eficiente para a remoção das partículas.

Os meios filtrantes de fibras de celulose também são utilizados no monitoramento do ar, nos campos automotivos, nos equipamentos de ar condicionados, nas indústrias farmacêuticas e alimentícias.

Atualmente, são raros os estudos sobre o comportamento dos meios filtrantes de celulose durante a operação de filtração. Estes meios filtrantes são descartados após o processo de filtração desconhecendo a quantidade de ciclos de filtração e limpeza necessários para a troca desses meios filtrantes e qual deles teriam o melhor custo e benefício.

Nos últimos tempos, têm aumentado o interesse dos pesquisadores pelo conhecimento do comportamento desses meios filtrantes em processos de filtração, com o

objetivo de torná-los cada vez mais eficientes e econômicos. A investigação do processo de formação e limpeza das tortas de filtração de gases pode aumentar a vida útil do filtro, diminuir a frequência de limpeza e aumentar a sua eficiência; diminuindo assim o seu custo operacional.

Devido a isso, este trabalho se propõe estudar o comportamento de dois meios filtrantes de celulose de Pinus, Rad Mais e Rad Plus, com diferentes permeabilidades, utilizando como material particulado o concentrado fosfático de Patos de Minas. A velocidade de filtração foi mantida constante em 10 cm/s com perda de carga máxima de 200 mmH₂O e 5 cm/s com perda de carga máxima de 100 mmH₂O. Foram realizados para cada meio filtrante, corridas de filtração composta de 100 ciclos sendo a vazão de alimentação do pó mantida constante durante todo o processo. O método de limpeza utilizado foi o fluxo de ar reverso, trabalhando com velocidade de limpeza de 13 cm/s e 18 cm/s.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Filtração

Filtração é o processo de separação de material particulado (sólido) de um fluido (gás ou líquido), que passa através de um meio poroso permeável.

Em processos de filtração de gás, o filtro é colocado na horizontal e através dele passa uma corrente de gás sujo carregado de partículas. As partículas podem ser coletadas na superfície do meio filtrante, nomeada de filtração superficial, ou, dependendo do meio filtrante, as partículas podem penetrar nas fibras, denominando assim de filtração de profundidade. As partículas coletadas no meio filtrante formam uma fina camada de pó, chamada de torta de filtração. Após a formação da torta, esta também passa a agir como meio filtrante, ou seja, também é responsável pela coleta das partículas que vão se acumulando e aumentando sua espessura, permitindo somente a passagem do gás limpo (Silva, C. R., 1998).

A remoção da torta, após algum tempo de filtração, é necessária para manter um processo de filtração adequado. A remoção da torta de pó, durante o processo de limpeza, ocorre aos pedaços (“patchy cleaning”). Existem vários processos que podem remover a torta, tais como: vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso. Com a formação da torta, a queda de pressão do sistema aumenta e após a limpeza, parte das partículas que permanecem no meio filtrante, causam a chamada queda de pressão residual (ΔP_R). A queda de pressão residual tende a alcançar, na prática, um valor constante após vários ciclos de filtração e limpeza ou aumentar sucessivamente dependendo do meio filtrante utilizado. Este parâmetro depende, entre outros fatores, da compressibilidade da torta de pó.

Nos processos de filtração e remoção de tortas, vários fatores devem ser avaliados, de forma a não interferirem nos mecanismos de coleta e de remoção da torta, sendo eles: as características do meio filtrante e do material particulado, a velocidade de filtração, a densidade e a viscosidade do gás, a velocidade de limpeza e a espessura da torta formada. Estes fatores influenciam diretamente na eficiência e na viabilidade econômica deste método de limpeza de gases.

A seguir serão apresentadas as técnicas de remoção das tortas de filtração.

2.2- Técnicas de limpeza de filtros

As técnicas mais comuns utilizadas na limpeza dos filtros manga, como a vibração mecânica, o fluxo de ar reverso e o pulso de ar reverso, serão descritas a seguir.

* **Vibração mecânica:** consiste em utilizar um motor para promover a vibração mecânica, gerando uma aceleração no tecido removendo a torta. Este método é considerado o mais antigo e de menor custo. Possui a vantagem de ter um sistema de operação e montagem simples e desvantagem de ter necessidade de interromper o processo de filtração para a limpeza (Tieni, E., 2005).

* **Fluxo de ar reverso:** consiste na passagem de ar limpo no sentido inverso da filtração removendo uma quantidade significativa da torta. Esta técnica permite que o tecido tenha uma vida útil maior devido ao impacto mecânico ser menor e possui a desvantagem da necessidade de interrupção do processo de filtração para limpeza (Tieni, E., 2005).

* **Pulso de ar reverso:** consiste na passagem de um pulso de ar no sentido inverso ao da filtração, removendo a torta formada. Nesta técnica não é necessário à interrupção da filtração durante a limpeza, pois esta ocorre em frações de segundo, porém, possui a desvantagem do tecido ter um tempo de vida útil menor devido a um maior desgaste das fibras (Tieni, E., 2005).

2.3 - Meios filtrantes

Existem hoje, diferentes tipos de meios filtrantes disponíveis e todos tem um importante papel na filtração. São eles: papel, cerâmicas, acrílico, polipropileno e muitos outros materiais (Dickenson, C., 1994). Os meios filtrantes são efetivamente o componente que permite a passagem do fluido, tendendo a reter os contaminantes, separando o material sólido dos líquidos ou gases.

A eficiência de filtração depende na maioria das vezes da seleção apropriada do meio, uma decisão que requer a consideração cuidadosa das vantagens e desvantagens de cada meio. Os quatro maiores critérios para avaliar o meio filtrante são: permeabilidade, eficiência de filtração, capacidade de filtração (ou vida útil) e custo de filtração.

O conceito de vida útil para meios filtrantes fibrosos é de grande importância na indústria de filtração. A vida útil dos meios filtrantes fibrosos é o ponto no qual a colmatação dos filtros ocorre contra um material particulado depositado (Japuntich, D.A. *et. al.*, 1996).

A definição mais próxima para colmatação de filtros é o cálculo padrão da ASHRAE 52-76 (1976): colmatação é a quantidade de massa acumulada do pó polidisperso para um limite arbitrário de queda de pressão em um filtro (Japuntich, D.A. *et. al.*, 1996). No padrão ASHRAE 52-76, um filtro de queda de pressão inicial alta poderia estar relacionado com uma baixa capacidade de retenção (Japuntich, D. A. *et. al.*, 1996).

No trabalho de Kimura e colaboradores (1985) constatou-se que rápida colmatação é mais provável com filtros de materiais de alta densidade de empacotamento e finas fibras.

Em 1953, Smith e Suprenant estudaram a caracterização de amostragem de ar em filtros de papel pelo carregamento com pó atmosférico, concluindo que o meio filtrante que colmata mais rápido não foi necessariamente o meio mais eficiente nem mesmo o que apresentou queda de pressão inicial mais alta (Japuntich, *et. al.*, 1996).

A seguir será detalhado o meio filtrante de fibras de celulose, por ser este o que será utilizado neste estudo.

2.3.1- Meios filtrantes de fibras de celulose

Celulose é um polímero comum em todas as plantas usadas para produzir fibras naturais, consistindo de uma longa cadeia de moléculas de glucose $(C_6H_{10}O_5)_n$ (Matteson, M.J. *et. al.* 1986).

Os meios filtrantes de celulose são folhas de materiais fibrosos não trançados feitos de fibras orgânicas com estruturas aleatórias (Song, *et. al.* 2006). Podem ser encontrados na

forma: tratado e não tratado, sendo que este último possui baixa resistência mecânica e sua aplicação como filtro mecânico é bastante limitado (Dickenson, 1994).

Meios filtrantes de papéis tratados possuem duas vantagens como meios filtrantes: capacidade de remover uma alta proporção de partículas finas e são bastante econômicos. Suas desvantagens são: alta resistência específica e limitada resistência mecânica, ou seja, resistência ao estouro.

Os meios filtrantes de celulose são em sua maioria usados na forma plissada, reduzindo a velocidade do fluxo através do papel e prevenindo o colapso das pregas durante o processo de filtração.

Alguns contaminantes sólidos tendem a penetrar no interior do papel tornando-o carregado, de forma a dificultar ou tornar impraticável a limpeza. No caso de fluidos “secos” como o ar, a limpeza pode ser realizada por fluxo de ar reverso, podendo o meio filtrante ser reutilizado após a limpeza. Em fluidos “úmidos” é mais usual empregar elementos de filtros descartáveis, substituindo-os quando entupidos (Dickenson, 1994).

No início da filtração, com o meio filtrante no estado limpo, as partículas tendem a penetrar no interior do meio filtrante sendo depositadas sobre as fibras, formando os chamados dendritos. Com um acúmulo maior de partículas durante os ciclos de filtração, as partículas de pó recobrem as fibras, tornando-as cada vez menos aparente, colaborando para a formação da torta na superfície do meio filtrante. Um esquema da formação dos dendritos está mostrado na Figura 2.1.



Figura 2.1: Representação esquemática da formação de dendritos

A Figura 2.2 apresenta micrografias da superposição dos dendritos sobre as fibras e da formação da torta na superfície do meio filtrante.

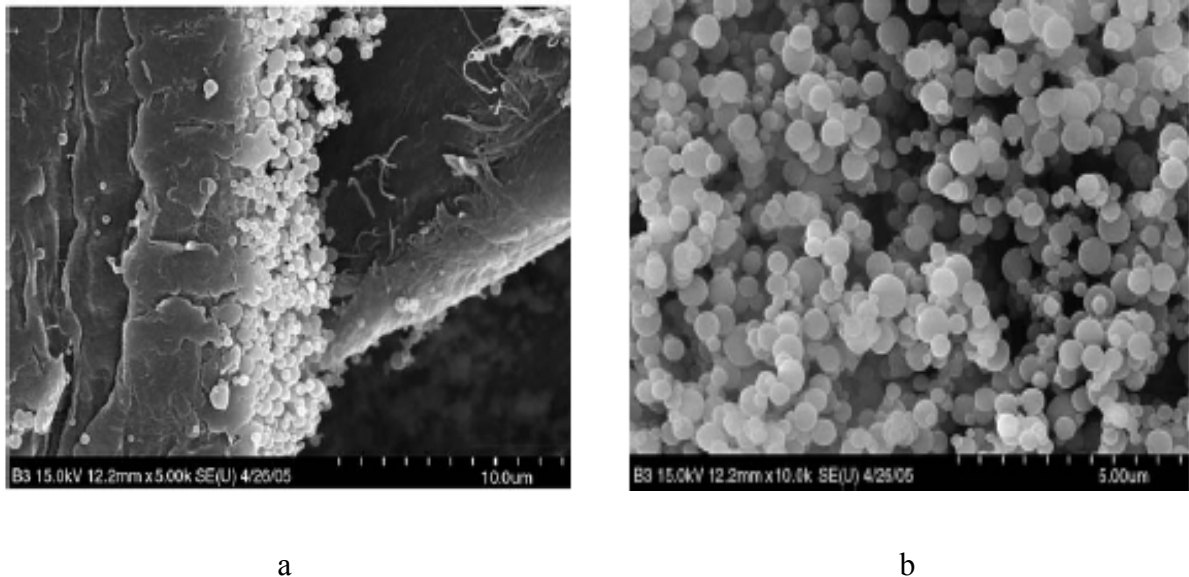


Figura 2.2: (a) Formação de dendritos no interior do meio filtrante, (b) formação da torta de filtração na superfície do meio filtrante (Song, 2006).

A Figura 2.2a mostra como material particulado se sobrepõe sobre as fibras no interior do meio filtrante, formando os dendritos. Na Figura 2.2b não é possível visualizar as fibras do meio filtrante devido à formação da torta de filtração.

2.3.1.1 – Filtros tipo Cartucho

Um tipo de filtro muito utilizado nas indústrias são os filtros cartuchos. Estes filtros separadores tipo cartucho ou cesto utiliza como meio filtrante uma membrana de celulose presa a uma tela metálica, tendo grande aplicação na separação gás/sólido, prevenindo e retendo a passagem de partículas finas no fluxo gasoso. A Figura 2.3 esquematiza um filtro tipo cartucho, com meio filtrante de fibras de celulose, na forma plissada.



Figura 2.3: Filtro cartucho com meio filtrante plissado.

A membrana de celulose plissada possui uma grande área filtrante, permitindo com isso uma vida mais longa dos meios filtrantes, maior capacidade de retenção de sólidos e conseqüentemente propicia uma grande economia ao usuário (Dickenson, 1994).

A penetração das partículas no meio filtrante é intensa em todos os poros, desde seu interior até as superfícies, tornando mais vantajoso à utilização de material um pouco mais espesso, porém com grande área superficial obtida através da plissagem do material filtrante (Guia para Condicionamento de Gás Natural – Gás Technical Systems).

Estes materiais filtrantes têm também a característica por permitir a eliminação de parte das partículas penetradas na superfície e no interior do meio filtrante, através de fluxo de ar reverso, o que significa que uma vez saturado, poderão ser regenerados em aproximadamente 40% de sua vida útil, a partir de sua primeira filtração. Regenerações subseqüentes terão progressivamente menor eficácia até que o elemento sature-se por completo, quando será necessária sua substituição ((Guia para Condicionamento de Gás Natural – Gás Technical Systems).

2.3.1.2- Etapas de fabricação dos meios filtrantes de fibras de celulose

Os meios filtrantes de fibras de celulose utilizados na filtração de gás são compostos em sua maioria por celulose produzida através de Pinus. A substituição da celulose de

Eucalyptus por celulose de *Pinus* melhorou a resistência à tração e ao arrebentamento e diminuiu a resistência ao rasgo, uma vez que esta é constituída de fibras longas e a celulose de *Eucalyptus* de fibras curtas.

A impregnação é uma importante etapa na fabricação dos meios filtrantes de fibras de celulose. Ela consiste na impregnação do papel por uma resina, sendo a mais utilizada a fenólica, que fornece ao papel a característica de alta resistência mecânica, ou seja, alta resistência ao estouro. A resistência do papel impregnado com resina pode ser superior aos meios filtrantes de feltros e tecidos similares (Dickenson, 1994).

Após a etapa de impregnação, em que o meio filtrante passa por um processo de aquecimento, o meio filtrante vai para o processo de "cura", onde este é submetido a um novo processo de aquecimento em estufa. Isso é necessário quando, no processo de montagem de certos filtros, é utilizado um tipo de cola como o "plastizol", para fixar as "tampas" nas extremidades do meio filtrante. Como envolve aquecimento, o papel perde água, aumentando sua rigidez e diminuindo sua gramatura.

Os meios filtrantes são recartilhados para evitar que, quando plissado, o papel "cole". As dobras permitem que exista um canal por onde o ar passe, ainda que as plissas estejam encostadas umas nas outras.

O meio filtrante de celulose possui duas faces, sendo uma de fluxo alto para a entrada do ar e a outra de fluxo baixo para a saída do ar, durante o processo de filtração. A diferença entre as faces de entrada e de saída de um meio filtrante impregnado é mostrada pelas Figuras 2.4a e 2.4b.

A Figura 2.5 mostra a diferença do meio filtrante de fibras de celulose de *Eucalyptus* (a) e de fibras de celulose de *Pinus* (b).

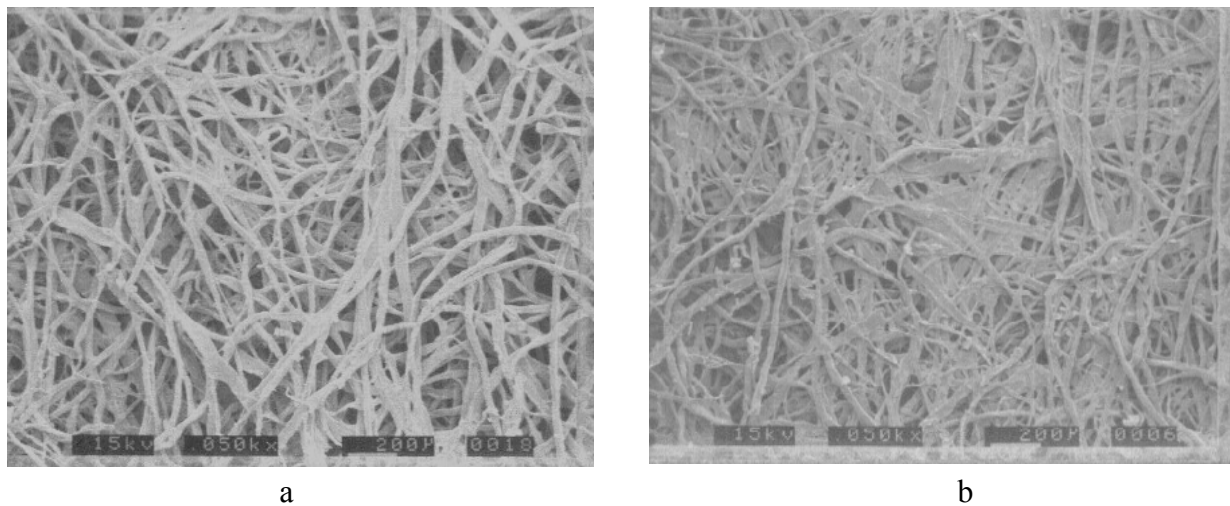


Figura 2.4: Observação microscópica do meio filtrante de celulose, (a) entrada de fluxo (50x) e (b) saída de fluxo (50x) (Catálogo Alhstrom Louveira).

Observa-se que os meios filtrantes de celulose de Eucalyptus possuem fibras mais finas que os meios filtrantes de celulose de Pinus.

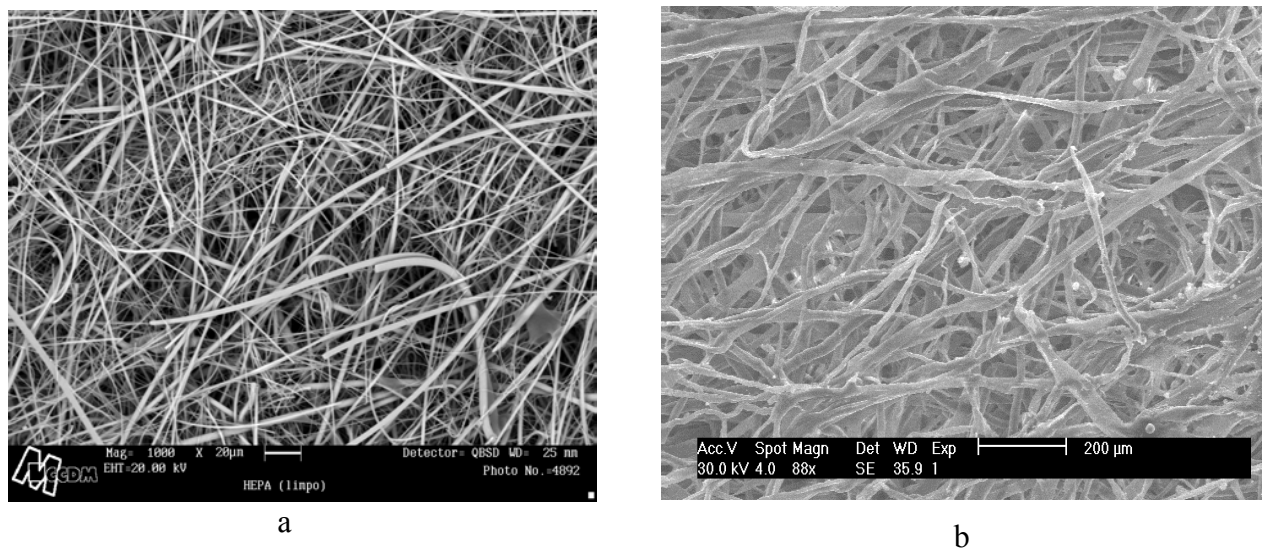


Figura 2.5: Observação microscópica do meio filtrante (a) fibras de celulose de Eucalyptus (1000x) e (b) fibras de celulose de Pinus (88x).

Esta característica da celulose de Pinus dá ao meio filtrante uma maior resistência durante o processo de filtração de gases.

Os meios filtrantes utilizados para coletar material particulado na atmosfera, para amostragem, não passam pelo processo de impregnação e são constituídos de 100% de celulose de *Eucalyptus*.

2.4 – Verificação dos filtros

O comportamento ideal de funcionamento do filtro é mostrado na Figura 2.6, na qual se observa a queda de pressão como função linear do tempo de filtração, ou seja, o tempo de filtração é o mesmo, para todos os ciclos. Na teoria este comportamento mostra que a remoção é uniforme com fluxos de volumes e de concentrações de pó constantes, o que não se observa na prática, uma vez que as partículas de pó que permanecem na superfície e no interior do meio filtrante após a limpeza, causam um aumento na queda de pressão residual, diminuindo então o tempo de filtração dos ciclos seguintes (VDI 3926, 2003).

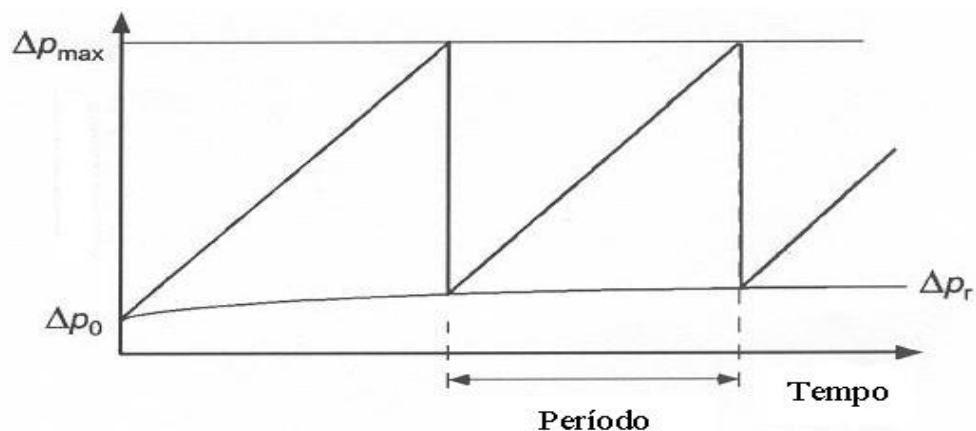


Figura 2.6: Ciclos de filtração ideais (Norma VDI3926, 2003)

O comportamento real dos ciclos de filtração pode ser visualizado na Figura 2.7. Nota-se que o tempo de filtração reduz muito em comparação com a Figura 2.6 e as curvas de filtração não possuem o comportamento linear nos primeiros ciclos. Isto se deve à compressão da torta de pó formada resultando em um tempo de filtração bem menor comparado com o comportamento ideal (VDI 3926, 2003).

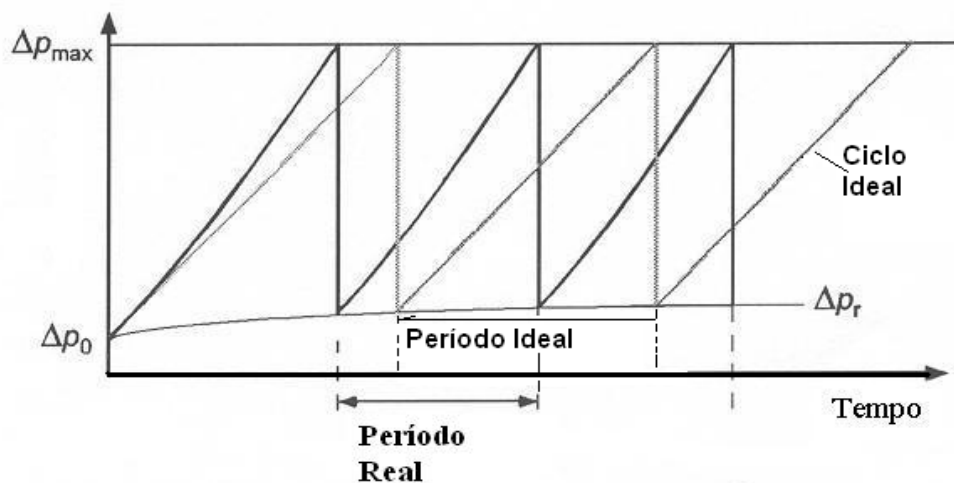


Figura 2.7: Ciclos de filtração reais (Norma VDI3926, 2003)

As partículas se aderem ao meio filtrante através da passagem do ar sujo pelo meio filtrante e as partículas seguintes se sobrepõem umas sobre as outras, comprimindo dessa forma a torta. Durante a compressão da torta, a porosidade é reduzida aumentando a resistência à passagem da corrente de gás. Essa compressão da torta foi verificada no trabalho de Aguiar (1995) e de Ito (2002).

De acordo com a Norma VDI3926, são necessários no mínimo 100 ciclos de filtração para chegar no comportamento estável, sendo em muitos casos, necessários mais de 1000 ciclos de filtração, dependendo da carga de pó. A estabilidade da queda de pressão residual, também pode ser determinada contando o número de ciclos de mesma duração e verificando o valor constante da queda de pressão residual, durante os ciclos. É preciso um certo cuidado em afirmar a estabilidade, porque podem ser percebidas alterações após grandes quantidades de ciclos. Quando se têm essas alterações nos ciclos, elas podem ser notadas em um tempo de 5 segundos (VDI 3926, 2003).

Após o primeiro ciclo de filtração, a torta de pó é removida incompletamente, ou seja, permanecem partículas na superfície do meio filtrante, reduzindo a efetividade da filtração. A remoção parcial da torta de pó é também conhecida como “Patchy Cleaning” (limpeza por blocos). Em caso de vazão volumétrica constante, a velocidade do ciclo aumenta formando mais rapidamente a mesma quantidade de torta de pó levando a diminuição do tempo de filtração. A

diminuição do tempo de filtração faz com que a curva de filtração fique convexa, como pode ser verificado na Figura 2.8 (VDI 3926, 2003).

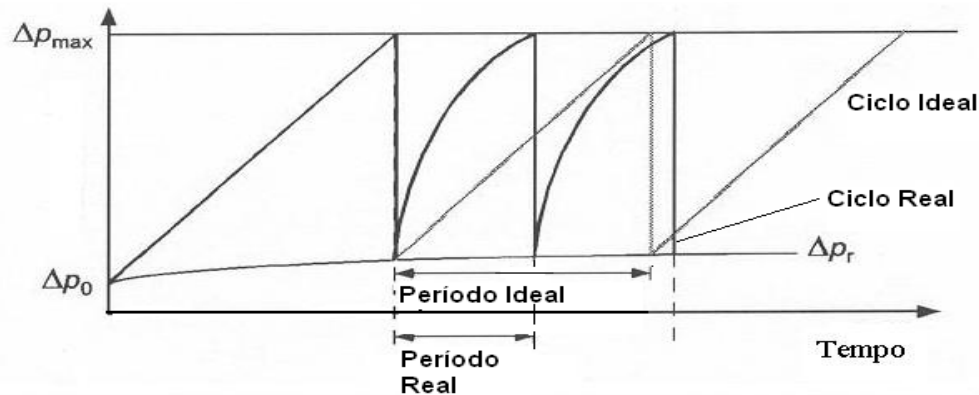


Figura 2.8: Ciclos de filtração reais, com comportamento de limpeza por blocos (peatchy cleaning) (Norma VDI3926, 2003).

2.5 – Permeabilidade

A permeabilidade de um meio poroso é um dos principais parâmetros em aplicações envolvendo filtração.

A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de seus poros ou vazios. Idealmente, o filtro deveria remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Isso pode ocorrer aumentando o volume de vazios na estrutura (porosidade) ou o tamanho da passagem do fluido (poro). Ambas opções acarretam, contudo, a diminuição da resistência mecânica da estrutura do filtro (Innocentini, e Pandolfelli, 1999). A passagem do fluido provoca uma perda de energia, que é refletida na forma de queda de pressão ao longo do meio poroso.

A modelagem de permeabilidade em meios porosos iniciou com Darcy em 1856, que propôs a primeira relação empírica para quantificar a resistência do fluxo para baixas velocidades de fluido através de meios porosos granular, homogêneo e incompressível (Innocentini et al, 1999).

Trabalhando com meios granulares não-consolidados, Darcy propôs que, para baixas velocidades, o gradiente de pressão (dP/dx) de um fluido incompressível com viscosidade μ escoando através de um meio poroso, fosse dado pela Equação 2.1:

$$\frac{-dP}{dx} = \frac{\mu v_s}{k_1} \quad (2.1)$$

sendo $-dP/dx$ é o gradiente de pressão ao longo da direção do fluxo, μ é a viscosidade do fluido e v_s representa a taxa de fluxo volumétrica. O parâmetro k_1 é constante para um dado meio poroso e pode ser referido como permeabilidade Darciana, coeficiente de permeabilidade ou permeabilidade intrínseca, dependendo do campo de pesquisa.

A integração da Equação (2.1) para a espessura (L) do meio poroso resulta na Equação 2.2:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{P_i - P_o}{L} = \frac{\mu v_s}{k_1} \quad (2.2)$$

sendo P_i e P_o , respectivamente, os valores absolutos de pressão medidos para a entrada e a saída do meio.

A equação (2.2), conhecida como Lei de Darcy para a permeabilidade, tem o grande mérito de ser simples e de separar as influências do fluido (μ), escoamento (v_s) e meio poroso (k_1). Por ser derivada de ensaios a baixas velocidades, no entanto, a Lei de Darcy considera unicamente os efeitos do atrito sobre a queda de pressão no filtro.

Reynolds em 1900 e Forchheimer em 1901, também, trabalhando com meios granulares, perceberam que a Lei de Darcy não apresentava bons resultados com o aumento da velocidade do fluido. Ao invés de uma relação linear entre queda de pressão e velocidade, ambos observaram uma relação parabólica, e associaram-na com a variação da energia cinética de um fluido incompressível com densidade (ρ) durante seu escoamento pelo meio poroso (Innocentini, e Pandolfelli, 1999).

Forchheimer então propôs a Equação (2.3), conhecida como equação de Forchheimer, em que uma nova constante, k_2 (expressado em metro no SI), foi introduzida, conhecida por permeabilidade não Darciana ou inercial.

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu v_s}{k_1} + \frac{\rho v_s^2}{k_2} \quad (2.3)$$

sendo, L a espessura do meio filtrante, μ a viscosidade do fluido e ρ a densidade do fluido.

Na equação de Forchheimer, o termo $\mu v_s/k_1$ representa os efeitos viscosos da interação fluido-sólido, enquanto o termo $\rho v_s^2/k_2$ representa os efeitos cinéticos.

Por efeitos viscosos, o fluido perde energia de dois modos. Primeiro, pelo atrito entre as moléculas do fluido durante o escoamento. Neste caso, quanto maior a viscosidade do fluido (μ), maior será o atrito e conseqüentemente a transformação da energia de pressão em calor. A outra forma de perda de energia ocorre pelo atrito entre o fluido e a parede do meio poroso. Aqui, a área de contato entre ambos, representada pela constante k_1 , quantifica esta perda de energia do fluido. Quanto maior a área de contato, maior será a resistência ao escoamento do fluido. Geralmente, o aumento de área é associado à diminuição do tamanho das partículas para estruturas granulares ou do tamanho do poro para estruturas celulares (Martins, J.C, 2001).

2.6 – Queda de Pressão no Filtro

A queda de pressão total no filtro é a diferença entre a pressão de entrada e a de saída do filtro através da passagem do gás pelo meio filtrante. À medida que a torta é formada, dificulta a passagem do gás pelo filtro aumentando a queda de pressão até atingir o valor limite para troca. Este é o parâmetro tecnicamente mais indicado para avaliar o entupimento do filtro e o momento ideal de sua troca.

Durante a coleta em um meio limpo a queda de pressão aumenta com a quantidade de partículas coletadas. Após a formação da torta esta também passa a atuar como meio filtrante

conduzindo a maior parte da filtração. Se a torta é incompressível, a queda de pressão aumenta linearmente com a espessura do depósito de pó, ou seja, com a quantidade de massa acumulada (Callé, *et. al.* 2002).

Durante a evolução do primeiro ciclo de filtração duas etapas podem ser distinguidas com relação à queda de pressão como função da massa acumulada coletada. Na primeira etapa, a evolução da queda de pressão ocorre lentamente, devido à formação da torta no interior do meio filtrante, onde ocorre a chamada filtração de profundidade. Na segunda etapa, o aumento torna-se linear devido à formação da torta de filtração. A Figura 2.9 apresenta a evolução do primeiro ciclo de filtração relacionando a queda de pressão como função da massa acumulada.

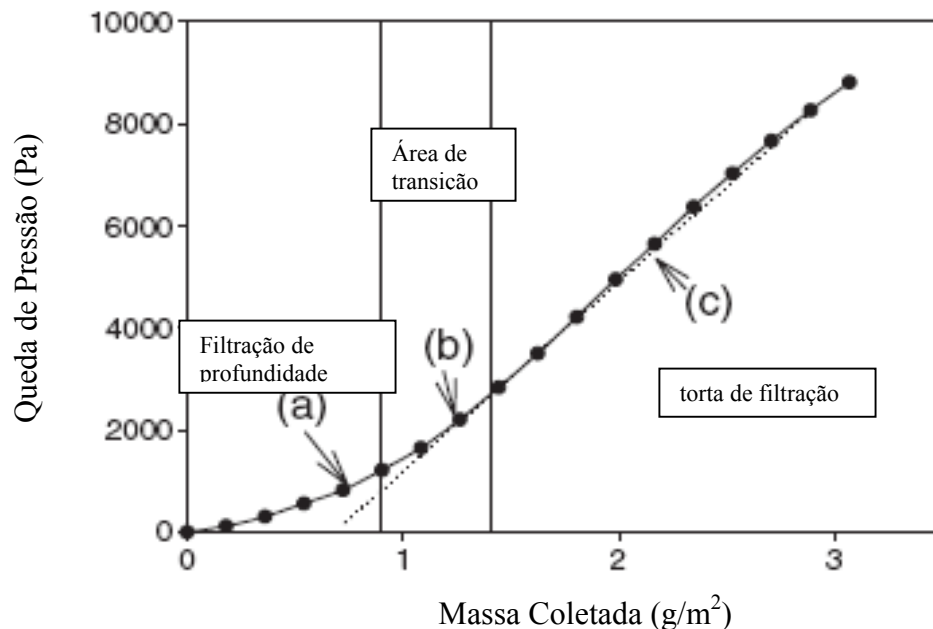


Figura 2.9: Queda de pressão como função da massa acumulada para o primeiro ciclo de filtração (Song, 2006).

A diferença da perda de carga do filtro limpo e do filtro após a limpeza é denominada de perda de carga residual. Com o aumento do número de ciclos, a perda de carga residual tende a aumentar devido o crescente acúmulo de partículas no meio filtrante (Dullien, 1989). De acordo com Callé et al, 2002b, a perda de carga residual tende a estabilizar após

vários ciclos de filtração e limpeza, indicando uma saturação do tecido. Porém, segundo Koch et al. (1996) e Stocklmayer e Hoflinger (1998a), em alguns casos este equilíbrio pode não ocorrer tornando impraticável o processo de filtração, tornando necessária a troca do meio filtrante.

A queda de pressão total no filtro (ΔP_T) pode ser considerada como a soma da queda de pressão através do meio filtrante (ΔP_F) e através da torta formada (ΔP_C), como mostra a Equação (2.4).

$$\Delta P_T = \Delta P_F + \Delta P_C \quad (2.4)$$

Na prática, a maioria dos filtros opera com quedas de pressão entre 5 e 20 cm de coluna d'água, mostrando ser a melhor faixa de operação no ponto de vista econômico, uma vez que para valores alto de queda de pressão é necessário o uso de equipamentos mais potentes e caros, com alto consumo de energia (Cavasseno, 1980).

2.6.1- Queda de pressão através do meio filtrante

A Lei de Darcy é a equação básica de filtração através de meios porosos e pode ser utilizada para descrever a queda de pressão total através de um meio filtrante, conforme apresentado na Equação 2.2.

Para aplicar a Lei de Darcy para os meios filtrantes é necessário conhecer ou ser capaz de medir as variáveis que aparecem na Equação 2.2. A queda de pressão (ΔP_T) e a velocidade de filtração são facilmente medidos. A resistência específica ($k_1 = L.\alpha\mu$) do meio filtrante pode ser considerada constante, uma vez que a espessura do tecido (L), em princípio não varia no processo de filtração.

A razão $1/\alpha$ é denominada de coeficiente de permeabilidade do meio filtrante e pode ser considerado constante para fluidos Newtonianos e incompressíveis, logo a equação de Darcy (Equação 2.2) pode ser rearranjada em função da resistência específica do meio filtrante como mostra a Equação 2.5:

$$\Delta P_F = k_1 V_f \quad (2.5)$$

2.6.2 - Queda de pressão através da torta

A espessura da torta (L_c) depende do tempo de filtração, visto que com o decorrer da filtração o material coletado acumula na superfície do meio, tornando difícil sua medida.

Uma variável mais facilmente medida em laboratório é a densidade da partícula de pó (ρ_p), a massa de pó depositada por unidade de área (W). Conhecendo a porosidade da torta (ε), a espessura da torta pode ser calculada pela Equação 2.6:

$$L_c = \frac{W}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.6)$$

Apesar de alguns pesquisadores Schimdt e Loffler (1991), Hoflinger (1994), Aguiar (1995) e Ito (2002) terem demonstrado que a porosidade da torta não permanece constante durante o processo de filtração. Considera-se que k_2 (resistência específica da torta) seja constante para tortas incompressíveis durante a filtração de gases. Portanto, a resistência específica da torta (k_2) pode ser expressa pela Equação 2.7.

$$k_2 = \frac{\alpha \mu}{\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.7)$$

Substituindo a equação 2.6 e 2.7 na equação 2.2, rearranjando tem-se a Equação 2.8:

$$\Delta P_c = k_2 V_f W \quad (2.8)$$

Uma vez determinada a queda de pressão através do meio filtrante (ΔP_F) (Equação 2.5) e a queda de pressão da torta formada (ΔP_C) (Equação 2.8), substituindo ambas na equação 2.4, chega-se à definição da queda de pressão total de filtração, como mostra a Equação 2.9.

$$\Delta P_T = \Delta P_F + \Delta P_C = k_1 V_f + k_2 V_f W \quad (2.9)$$

sendo: ΔP_F = queda de pressão no filtro

ΔP_C = queda de pressão na torta de pó

k_1 = resistência específica do meio filtrante

k_2 = resistência específica da torta

V_f = velocidade de filtração

W = massa de pó depositada por unidade de área

2.7 – Limite da Lei de Stokes para k_2

Para um meio composto de esferas isoladas, a lei de Stokes descreve a queda de pressão conforme a Equação (2.10).

$$\Delta P = \frac{3\pi\mu V_f dN}{C} \quad (2.10)$$

sendo N o número de esferas de diâmetro d por unidade de área e C o fator de correção de Cunningham.

A relação de Stokes definida na Equação 2.10 só é válida se a porosidade se aproxima da unidade. Substituindo a Equação 2.10 na Equação 2.8, sendo $W = N\rho_p \pi d^3 / 6$, chega-se na Equação 2.11:

$$k_{2St} = \frac{18\mu}{\rho_p d^2 C} \quad (2.11)$$

A Equação 2.11 define a queda de pressão através de uma montagem de esferas uniformemente distribuída no espaço e distante o suficiente para que não haja nenhuma interação entre elas.

Para mostrar o efeito da porosidade, Rudnick definiu o fator de resistência R, a qual fornece um valor real de k_2 quando multiplicados por k_{2St} , mostrado na Equação 2.12:

$$k_2 = Rk_{2St} \quad (2.12)$$

sendo R sempre maior do que a unidade, se a porosidade for baixa R tem um valor grande e se a porosidade se aproxima da unidade, R também se aproxima dela.

2.7.1 - Equação de Kozeny – Carmam para calcular R

A relação Kozeny-Carman é freqüentemente usada para descrever a queda de pressão através de um depósito de pó. Assume-se que o fluxo ocorre através de capilares cuja superfície se iguala a das partículas que compõe o meio e o volume dos capilares se iguala ao volume de vazios do meio. Para isto tem-se a Equação 2.13:

$$R = \frac{2k_{ck}(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (2.13)$$

A constante empírica k_{ck} (constante de Kozeny Carman) é igual a 4,8 para partículas esféricas e 5,0 para partículas irregulares. Quando o valor da porosidade tende para unidade a Equação 2.13, prediz que R tende a zero, no entanto se a porosidade é alta a Equação de Kozeny-Carman prediz valores muito baixo para R e para a queda de pressão (Rodrigues, 2004).

2.7.2 – Valor experimental da resistência específica da torta (k_2)

O valor teórico de k_2 depende fortemente da porosidade do meio, sendo esta difícil de ser medida, portanto, essa variável é geralmente desconhecida. No entanto k_2 pode ser determinada experimentalmente e passa a ser chamado de k_2' , para distinguir do valor teórico. O k_2' experimental é calculado pelo aumento na queda de pressão, $(\Delta P_2 - \Delta P_1)$ no filtro com o ganho de massa $(M_2 - M_1)$ para o acúmulo de pó, conforme é mostrado na Equação 2.14 (Aguiar, 1991).

$$k_2' = \frac{A(\Delta P_2 - \Delta P_1)}{V_f(M_2 - M_1)} \quad (2.14)$$

Cheng e Tsai (1998) estudaram a influência do tipo de material particulado e da velocidade superficial de filtração no valor da resistência específica de tortas de filtração (k_2) e na compactação das mesmas, conclui que maiores velocidades de filtração resultaram em uma maior compactação da torta e menor porosidade, apresentando, no entanto, maiores valores de k_2 .

2.8 – Força de Arraste / Arraste Efetivo

A pressão total de filtração (ΔP_T) foi definida na Equação 2.9 como sendo a soma da queda de pressão do meio filtrante (ΔP_M) com a queda de pressão da torta (ΔP_C), e pode ser reescrita conforme apresentada na Equação 2.9:

$$\Delta P_T = k_1 V_f + k_2 V_f W \quad (2.15)$$

Para fluxo laminar a queda de pressão é proporcional à velocidade de filtração. Dividindo a Equação 2.15 por V_f chega-se na Equação 2.16:

$$\frac{\Delta P_T}{V_f} = k_1 + k_2.W \quad (2.16)$$

Sendo o arraste efetivo do filtro (S) definido como a razão entre a queda de pressão (ΔP) pela velocidade superficial de filtração V_f , tem-se a Equação 2.17:

$$S = k_1 + k_2.W \quad (2.17)$$

A Equação 2.17 é baseada no fato que o aumento no arraste é linear com o aumento na densidade de área, mas, experimentalmente verifica-se que o arraste é uma função linear somente após a formação da torta.

O arraste (S_E), em um ponto qualquer nas condições iniciais de filtração, pode ser calculado pela extrapolação da parte linear da curva até o ponto desejado, como demonstra a Figura 2.10.

Logo, o arraste efetivo pode ser calculado como mostra a Equação (2.18), em que W_R é a massa residual de pó por unidade de área, determinado experimentalmente pela Equação 2.18:

$$S = \frac{\Delta P_T}{V_f} = S_E + k_2.(W - W_R) \quad (2.18)$$

Coury (1983) desenvolveu um método, denominado de método indireto, onde a equação clássica de Ergun (Equação 2.19), era usada para estimar os valores de porosidade das tortas, desprezando o efeito inercial para valores baixos de velocidades de filtração.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu V_f}{d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (2.19)$$

sendo: ρ_g é a densidade do gás,

μ é a viscosidade do gás,

V_f é a velocidade superficial do fluido,

d_p é o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes),

L é a espessura do meio filtrante.

Coury (1983) considerou a vazão mássica conforme a Equação 2.20:

$$Q = M/t \quad (2.20)$$

Em que M era a massa depositada e t o tempo de filtração, substituindo na Equação 2.6 e considerando $W = M/A$ (massa de pó depositada por unidade de área), pode-se definir L pela Equação 2.21:

$$L = \frac{Qt}{A\rho_p(1-\varepsilon)} \quad (2.21)$$

substituindo na equação 2.19 chega-se na Equação 2.22:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 A\rho_p} \frac{\mu Q V_f}{d_p^2} + 1,75 \frac{Q}{\varepsilon^3 A\rho_p} \frac{\rho_g V_f^2}{d_p} \quad (2.22)$$

que é a Equação de Ergun modificada em relação ao tempo de filtração.

Os primeiros termos da equação 2.22 são relativos aos componentes viscosos e os segundos termos são relativos ao componente inercial, sendo este último desprezível no caso de escoamentos puramente viscosos, como nos gases, a Equação 2.22 pode ser reduzida para a Equação 2.23:

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1 - \varepsilon) \mu Q V_f}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} \quad (2.23)$$

Outros métodos para determinar porosidade foram estudados por Aguiar (1995) e Cheng e Tsai (1998). Aguiar (1995) determinou a porosidade a partir da obtenção de imagens representativas da seção transversal de tortas de filtração de gases obtidas através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) e, posteriormente, analisadas em programas de análises de imagens, sendo este método denominado de método direto. Cheng e Tsai (1998) determinaram a porosidade usando valores de espessura da torta medidas em um equipamento a laser e da massa de pó depositada no meio filtrante por unidade de área ITO (2002).

Negrini *et. al.* (2000) estudou a determinação da porosidade de tortas em função da velocidade de filtração e concluiu que a porosidade média experimental diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração.

Cheng e Tsai (1998) observaram, que maiores velocidades de filtração resultam em uma maior compactação da torta e conseqüentemente em menores valores de porosidades.

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão relacionados os equipamentos, os materiais e métodos que foram utilizados nos procedimentos experimentais para caracterização do meio filtrante, do material pulverulento e realização dos ciclos de filtração e limpeza.

3.1 – Equipamentos

O equipamento utilizado nos procedimentos experimentais de filtração, limpeza de filtros e caracterização do meio filtrante está descrito a seguir.

3.1.1- Equipamentos Usados para Filtração e Limpeza

O equipamento usado para filtração e limpeza consistia de uma caixa de filtração, um alimentador de pó, um sistema de controle composto de um microcomputador, soprador, ar comprimido, micro-manômetros digitais e meios filtrantes.

A Figura 3.1 mostra uma visão geral do equipamento utilizado no processo, sendo que este estava disponível no laboratório do Departamento de Engenharia Química da UFSCar.

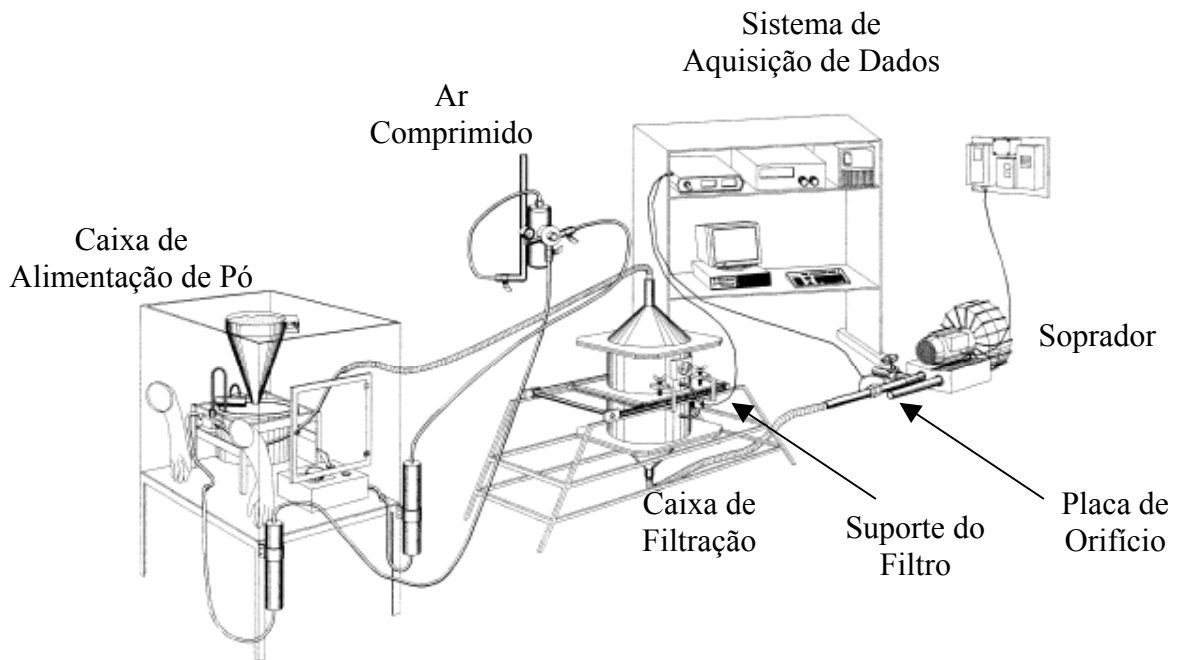


Figura 3.1: Vista Geral do Equipamento de Filtração

Outros equipamentos periféricos como medidor de umidade e temperatura, balança, também foram utilizados.

3.1.1.1 – Caixa de filtração

A caixa de filtração era composta de dois cilindros de PVC com um espaço entre eles, onde fica preso o meio filtrante entre duas placas metálicas. O meio filtrante responsável por coletar o material particulado consiste de um papel de seção circular de 18 cm de diâmetro e 254 cm² de área, onde este é colocado entre duas placas metálicas, inserido ao meio da caixa de filtração e esta é presa por quatro garras de fixação. A tampa era presa através de parafusos permitindo uma boa vedação do sistema.

A tampa do cilindro era ligada através de um cano ao gerador de pó. Dois medidores de pressão situados antes e depois da passagem do fluxo pelo meio filtrante fornecem dados que eram enviados para o sistema de controle.

Durante a o processo de filtração a caixa era mantida na posição vertical e durante a limpeza era mantida na posição horizontal.

A Figura 3.2 esquematiza a caixa de filtração:

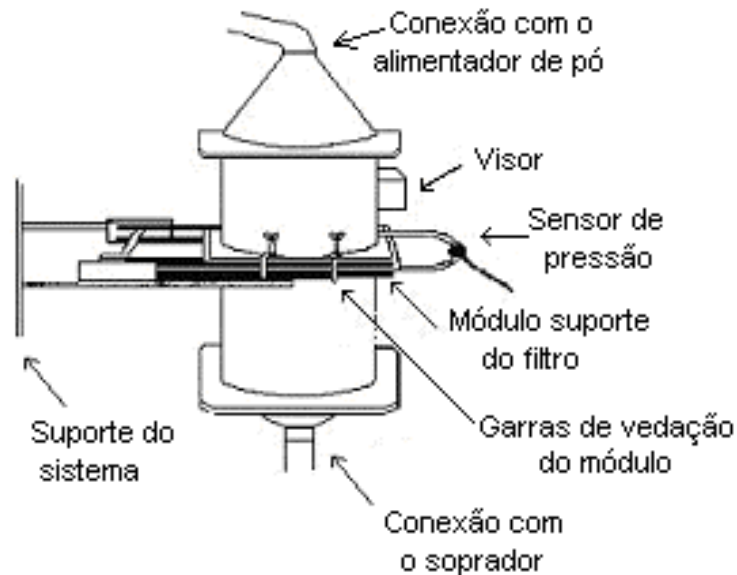


Figura 3.2: Caixa de filtração e limpeza

3.1.1.2 – Alimentador de pó

O alimentador de pó se encontra dentro de uma caixa de acrílico e consiste de um prato giratório de aço inoxidável, ligado a um reservatório cônico para alimentação do pó e um sugador tipo Venturi. O prato possuía um sulco semicircular a qual o pó tendia a preencher conforme a rotação do prato e então sugado pelo sugador tipo Venturi.

O prato giratório era calibrado em uma velocidade de alimentação do pó conectado por um variador de velocidade.

Através da Figura 3.3 é possível visualizar o alimentador de pó.

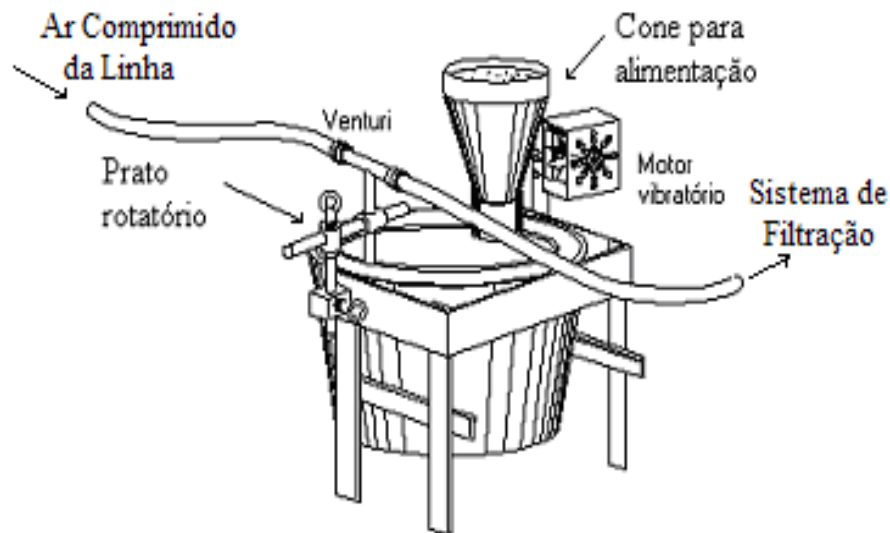


Figura 3.3: Sistema de alimentação de pó

3.1.1.3 – Desumidificadores

Durante todo o experimento a umidade era controlada na caixa de acrílico até o limite de 15% para que não ocorresse aglomeração do material particulado no papel. O ar era passado e desumidificado através de duas colunas de desumidificação contendo sílica gel colocada na parte externa do equipamento e no interior da caixa de acrílico também possuía três copos contendo sílica gel.

3.1.1.4 – Sistema de Controle, Medidores de Pressão, de Vazão

O sistema de controle de aquisição de dados era constituído por um microcomputador 486 DX2 com uma placa de aquisição de dados que permitia a leitura de 16 sinais de sensores externos e controle de dois atuadores analógicos e 24 linhas de entrada e saída digitais, elaborado na linguagem Visual Basic 3.0 para a coleta dos registros de interesse.

O software atuava na rotação do motor permitindo que o ar fosse sugado ou soprado mantendo as velocidades de filtração e limpeza constantes durante o experimento. Com o

aumento da perda de carga durante a filtração, a vazão de ar tende a diminuir, e para evitar isso, o software acelera a rotação do motor, mantendo a velocidade de ar constante.

Para medir a velocidade de filtração, utilizou-se um medidor tipo placa de orifício de 8 mm de diâmetro, calibrada e instalada na linha entre a saída do filtro e o soprador, conectado a um sensor de pressão, lida pela placa de aquisição instalada no micro.

3.1.1.5 – Demais Periféricos

Outros equipamentos utilizados para a realização destes experimentos foram: uma balança digital semi-analítica para pesagem dos filtros e massas removidas de pó, para obtenção do diâmetro do pó um analisador de granulometria marca Mastersizer Malvern Microplus v.2.19, um analisador de porosidade marca Quantachrome Instruments Poremaster 33, para medida de densidade do pó um picnômetro a Hélio marca Micrometrics e para obtenção de micrografias dos meios filtrantes, um Microscópio Eletrônico de Varredura Marca Philips, Modelo XL 30 FEG do Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da UFSCar (DEMA).

3.2 – Materiais

Os materiais utilizados no experimento estão descritos a seguir

3.2.1– Meios Filtrantes

Os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus, utilizados neste trabalho foram os meios filtrantes de fibras de celulose derivada de Pinus. Estes papéis foram fornecidos pela Empresa Ahlstrom Louveira, cujas especificações informadas por esse fabricante são descritas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Caracterização dos meio filtrantes de celulose (Alhstrom Louveira).

Propriedades físicas	Tipos de filtro	
	RAD +	RAD PLUS
Gramatura (não tratada) (g/m ²)	118	120
Espessura (μm)	450	350
Corrugação (μm)	310	330
% Resina	18	16
Resistência à ruptura – não tratado (kPa)	300	400
Resistência à ruptura – tratado (kPa)	190	—
Permeabilidade (l/m ² sec)	240	110
Queda de pressão para 240l/mim/100cm ² (*)	36,8 mmWC	81,8
Tamanho máximo de poros (μm)	59	42
Tamanho médio de poros (μm)	46	31

(*) Estes resultados são obtidos usando uma correlação matemática.

Além das características informadas pelo fabricante foi determinada, para caracterização do meio filtrante, a porosidade através do porosímetro, marca Quantachrome Instruments Poremaster 33.

3.2.2 – Material Pulverulento

O material pulverulento utilizado no experimento foi um material inorgânico, o concentrado fosfático de Patos de Minas – MG, fornecido pela Fosfértil S. A., de cor marrom acinzentado, disponível no laboratório do Departamento de Engenharia Química da UFSCar. A densidade do material não filtrado foi de 2,99 g/cm³, obtido no Picnômetro a Hélio, o diâmetro médio de Stokes das partículas, obtido DEMA-UFSCar, no equipamento CAPA 700 - Particle Sizer Distribution Analyser – HORIBA foi de 1,76 μm e o diâmetro médio volumétrico 8,34 μm, obtido no Malvern Mastersizer Microplus. O diâmetro aerodinâmico foi obtido pela equação 3.1, com valor igual a 3,04μm.

$$\frac{\rho_0 \cdot d_a^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} = \frac{\rho_p \cdot d_{st}^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (3.1)$$

Em que ρ_0 é a densidade padrão de 1 g/cm^3 , ρ_p é a densidade da partícula, g é a aceleração da gravidade, d_a é o diâmetro aerodinâmico, d_{st} é o diâmetro de Stokes e μ a viscosidade.

A distribuição granulométrica do pó está apresentada na Figura 3.4:

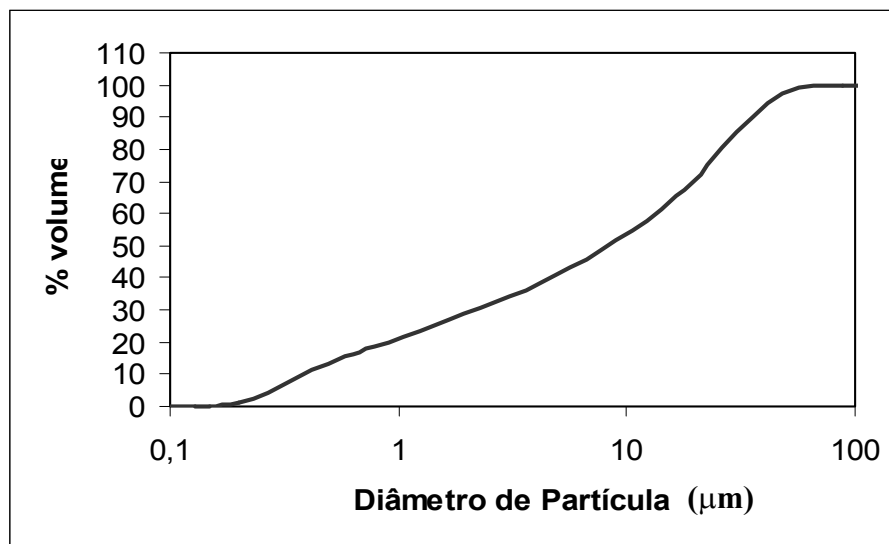


Figura 3.4: Variação da % acumulada em volume em função do diâmetro de partícula para o concentrado fosfático, obtido no Malvern Mastersizer Microplus.

3.3 - Realização dos ensaios

A seguir serão descritos os ensaios de filtração e remoção de torta.

3.3.1 – Filtração

O processo de filtração foi realizado através da passagem do gás “sujo” com material particulado pelo meio filtrante onde as partículas do pó foram coletadas, formando a torta de filtração.

Inicialmente, a rotação do prato do alimentador de pó foi ajustada para dar um giro com velocidade correspondente a 2 minutos, para velocidade de filtração de 10 cm/s e 2 minutos e 20 segundos, para velocidade de filtração de 5 cm/s. A pressão foi mantida constante em 4,0 Pa. A diferença do tempo de rotação do prato do alimentador de pó foi necessária para que as partículas tivessem um tempo maior de penetração no interior do meio filtrante para a velocidade de filtração igual a 5 cm/s.

Em seguida, o pó era depositado no reservatório cônico contido dentro da caixa de acrílico, onde esta foi fechada e o ar comprimido foi ligado para alimentar o interior da caixa e o gerador de pó com ar praticamente seco. O ar comprimido antes de entrar na caixa de filtração passava por dois desumidificadores. A umidade relativa era mantida em torno de 10% a 15%.

O meio filtrante de papel foi cortado em forma circular, com diâmetro de 21 cm, pesado, colocado entre os suportes metálicos da caixa de filtração e presos através de garras.

Após todos os acertos e calibrações, o soprador era ligado, esperava-se atingir a velocidade de filtração estabelecida para o experimento. Em seguida foram acionados juntos o soprador e a rotação do prato do alimentador de pó. O soprador tinha a função de sugar o ar sujo contido na caixa de acrílico. O ar sujo passava pelo meio filtrante e as partículas eram coletadas formando a torta de filtração. A filtração era mantida até que atingisse a perda de carga determinada para o experimento.

A escolha das variáveis de trabalho para a primeira parte experimental foi baseada em trabalhos anteriores, Rodrigues (2006), Tiene (2005) que apresentaram bons resultados, sendo a V_f de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 200 \text{ mmH}_2\text{O}$.

A segunda parte experimental tinha como objetivo modificar apenas uma variável de trabalho, a velocidade superficial de filtração. O trabalho com V_f de 5 cm/s e perda de carga de 200 mmH₂O não foi possível devido à formação de uma torta muito espessa o que tornou difícil o manuseio da torta durante a limpeza. Para V_f de 15 cm/s testada, o tempo de filtração

foi muito curto não sendo possível acompanhar a evolução do processo de filtração para o meio filtrante de celulose. Com isso, tornou-se necessário trabalhar variando a velocidade superficial de filtração junto com a perda de carga máxima do processo de filtração. Os padrões que apresentaram melhores condições de trabalho foram V_f de 5 cm/s e $\Delta P_{\text{máx}} = 100 \text{ mmH}_2\text{O}$.

3.3.2 – Remoção da torta

O método utilizado para a remoção da torta foi o fluxo de ar reverso que consiste na passagem do ar limpo no sentido inverso ao da filtração fazendo com que a torta formada se destaque do meio filtrante, proporcionando assim a limpeza.

Para realizar o processo de remoção da torta, logo após a filtração, a tampa do suporte de filtração era retirada, o suporte colocado na posição horizontal e todo o pó contido nas bordas eram então retirados com auxílio de um pincel, restando somente o material particulado que fizesse parte da torta de filtração. Uma folha de papel era pesada e colocada na parte inferior da caixa de filtração para coletar as partículas que desprendiam da torta durante o processo de limpeza do meio filtrante.

A placa de orifício que liga o soprador à caixa de filtração era invertida, e o soprador era ajustado para soprar o ar em vez de sugá-lo. A velocidade de limpeza era ajustada através do sistema de controle.

O soprador era acionado na velocidade escolhida para experimento. Após 1 minuto de limpeza o soprador era desligado e a folha de papel onde as partículas foram coletadas era pesada. O cálculo da diferença do peso inicial da folha e o peso da folha contendo as partículas foi usado para obtenção da massa removida.

Os processos de limpeza eram repetidos em cada torta formada, utilizando sempre a limpeza por fluxo de ar reverso com velocidade de limpeza igual a 18 cm/s ou 13 cm/s.

3.4 – Cálculos

3.4.1 – Cálculo da vazão de alimentação

A vazão de alimentação pôde ser estimada calculando a massa de pó necessária para o preenchimento do sulco semicircular do prato giratório. Foram feitas três medidas da massa de pó obtendo a vazão através da equação 3.2 e obtida a médias entre elas.

$$Q = \frac{M}{t} \quad (3.2)$$

sendo, M a massa de pó e t o tempo de rotação do prato.

3.4.2 – Cálculo de porosidade

Através da Equação de Ergun (Equação 2.22), pôde-se estimar a porosidade da torta (ε), para um dado conjunto de condições experimentais e ΔP medido em função de t.

Foram realizadas para cada ensaio de 100 ciclos de filtração, medidas de porosidade para alguns ciclos, para análise do comportamento da porosidade conforme o número de ciclos.

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3 A \rho_p} \frac{\mu Q V_f}{d_p^2} + 1,75 \frac{Q}{\varepsilon^3 A \rho_p} \frac{\rho_g v_f^2}{d_p} \quad (2.22)$$

3.4.3 - Cálculo da Resistência Especifica da torta (K_2)

O valor experimental da resistência específica da torta (K_2) pode ser estimado a partir de medidas experimentais, como apresentada na Equação 2.14, definidas através do aumento da

queda de pressão ($\Delta P_2 - \Delta P_1$) no filtro e do ganho de massa ($M_2 - M_1$), devido ao acúmulo de pó no meio filtrante.

$$K_{2,\text{exp}} = \left(\frac{A}{V_f} \right) \left(\frac{(\Delta P_2 - \Delta P_1)}{(M_2 - M_1)} \right) \quad (2.14)$$

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 – Caracterização dos meios filtrantes

Para caracterização dos meios filtrantes foram obtidas micrografias no microscópio eletrônico de varredura da superfície de entrada e saída da corrente de gás, para os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus, e estão apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

Conforme indicado pelo fabricante, a superfície de entrada do fluxo de gás, para o meio filtrante de celulose apresenta uma estrutura de fibras mais aberta, sendo a fibra do lado de saída do fluxo mais fechada, permitindo uma captura maior número de partículas. Esta característica dos meios filtrantes de celulose pode ser observada nas Figuras 4.1 e 4.2.

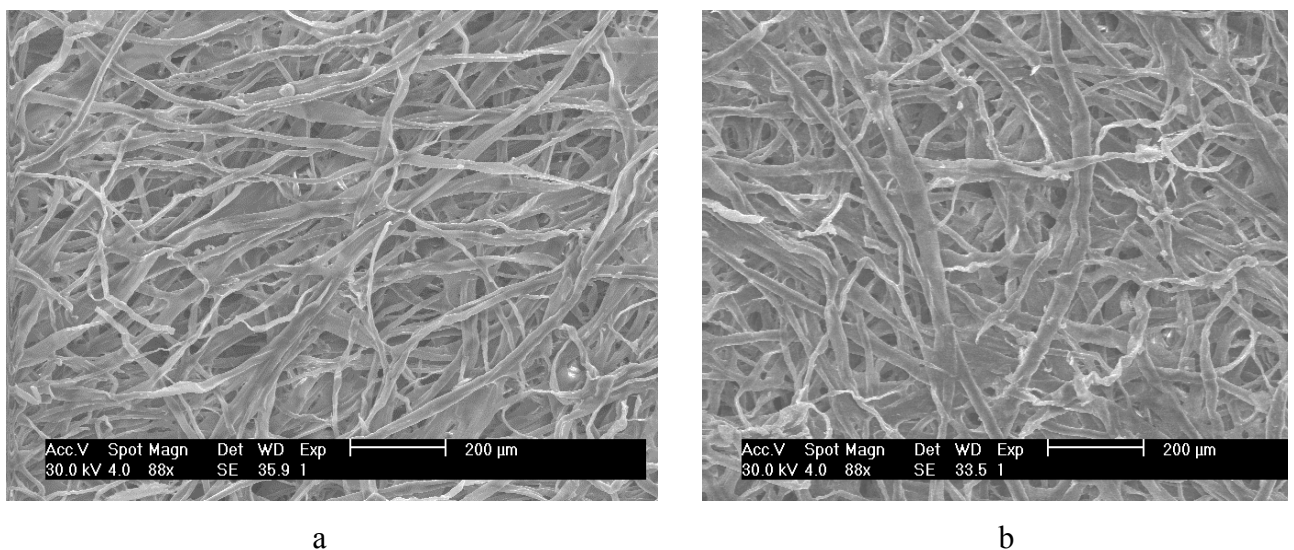


Figura 4.1: Observação microscópica do meio filtrante Rad Mais, (a) entrada do fluxo (88x) e (b) saída do fluxo (88x).

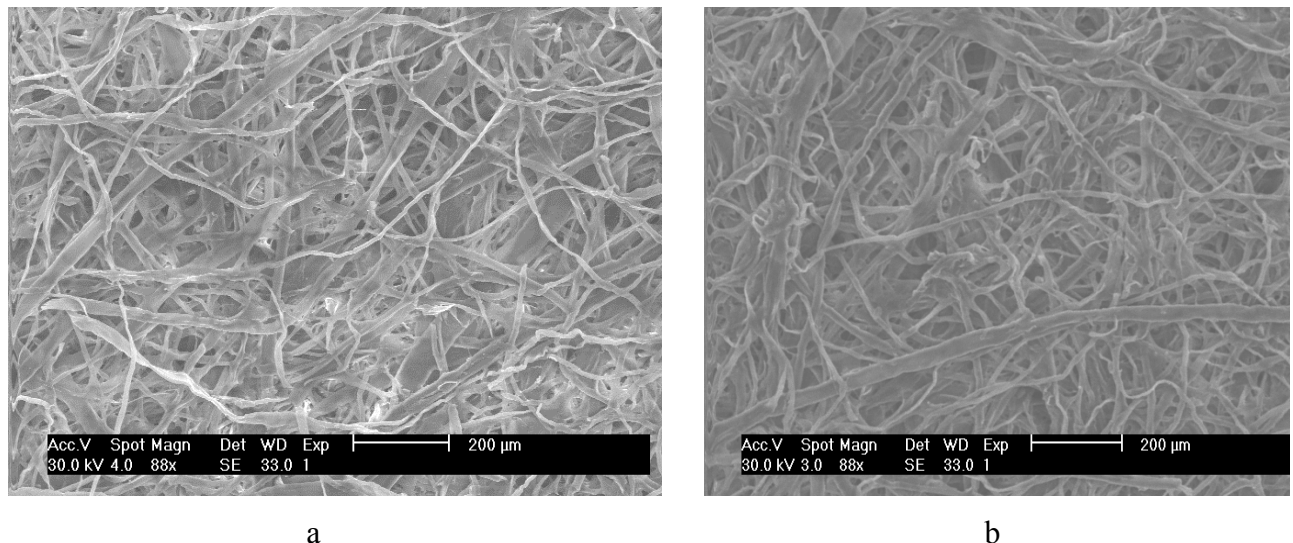


Figura 4.2: Observação microscópica do meio filtrante Rad Plus, (a) entrada do fluxo (88x) e (b) saída do fluxo (88x).

A porosidade também foi determinada para os dois meios filtrantes, utilizando o porosímetro da Quantachrome Instruments Poremaster 33, os valores da porosidade encontrados foram 0,71 para o meio filtrante Rad Mais e 0,70 para o Rad Plus.

A vazão de alimentação mássica foi medida obtendo valores de 0,04 g/s para velocidade de filtração de 10 cm/s e de 0,03 g/s para a velocidade de filtração de 5 cm/s, sendo mantida constante durante todo o processo de filtração para as duas velocidades de filtração investigadas.

Os resultados obtidos para os meios filtrantes, Rad Mais e Rad Plus, nas duas condições experimentais testadas serão descritos a seguir.

4.2- Ciclos de filtração e limpeza

O comportamento dos meios filtrantes durante o processo de filtração e limpeza foi analisado separadamente por velocidade de filtração e em seguida foi realizada uma comparação entre os dois meios filtrantes testados.

4.3 - Investigação para o meio filtrante Rad Mais e Rad Plus na velocidade de filtração de 10 cm/s

1ª Parte Experimental

Para esse estudo, a velocidade de filtração (V_f) foi mantida constante, durante todos os ciclos de filtração, em 10 cm/s. Foram utilizadas duas velocidades de limpeza (V_l) de 13 cm/s e de 18 cm/s. Em todos os testes a queda de pressão máxima foi mantida em 200 mmH₂O.

A evolução da queda de pressão para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais estão apresentadas em função da massa coletada acumulada por unidade de área durante 100 ciclos de filtração e limpeza. Outras características do processo de filtração como: massa removida, massa retida acumulada, perda de carga residual, eficiência de remoção do filtro, porosidade da torta de filtração e resistência específica da torta, também são apresentadas para uma melhor compreensão e escolha do meio filtrante mais adequado.

4.3.1 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Mais

O meio filtrante Rad Mais possui permeabilidade de 240 L/m²sec, espessura de 450 μ m e tamanho médio de poros de 46 μ m. Estas características são relevantes para avaliar o comportamento deste meio filtrante durante o processo de filtração.

Os gráficos de perda de carga em função da massa coletada acumulada durante os 100 ciclos de filtração e limpeza, para essas condições experimentais, estão mostrados nas Figuras 4.3a e 4.3b.

Ambas as Figuras 4.3a e 4.3b mostram a tendência dos ciclos de filtração se tornarem cada vez mais curto, devido um aumento na perda de carga inicial de cada ciclo. Observa-se na Figura 4.3a que o meio filtrante Rad Mais para V_l de 18 cm/s foi o que obteve uma duração maior dos ciclos de filtração contribuindo para uma maior quantidade de massa coletada acumulada durante o processo de filtração e limpeza. Conforme indica a Figura 4.3a, o meio filtrante teve um acúmulo de massa de aproximadamente 0,55 g/cm² tendendo a estabilizar aproximadamente após 0,3 g/cm². Já para o meio filtrante, com V_l de 13 cm/s o tempo dos ciclos

de filtração foi menor, formando uma torta menos espessa o que pode ser observado pelo baixo valor de massa total coletada por unidade de área sendo de $0,24 \text{ g/cm}^2$. A Figura 4.3b mostra que o meio filtrante acumulou $0,24 \text{ g/cm}^2$ não apresentando tendência a estabilizar os valores de perda de carga residual.

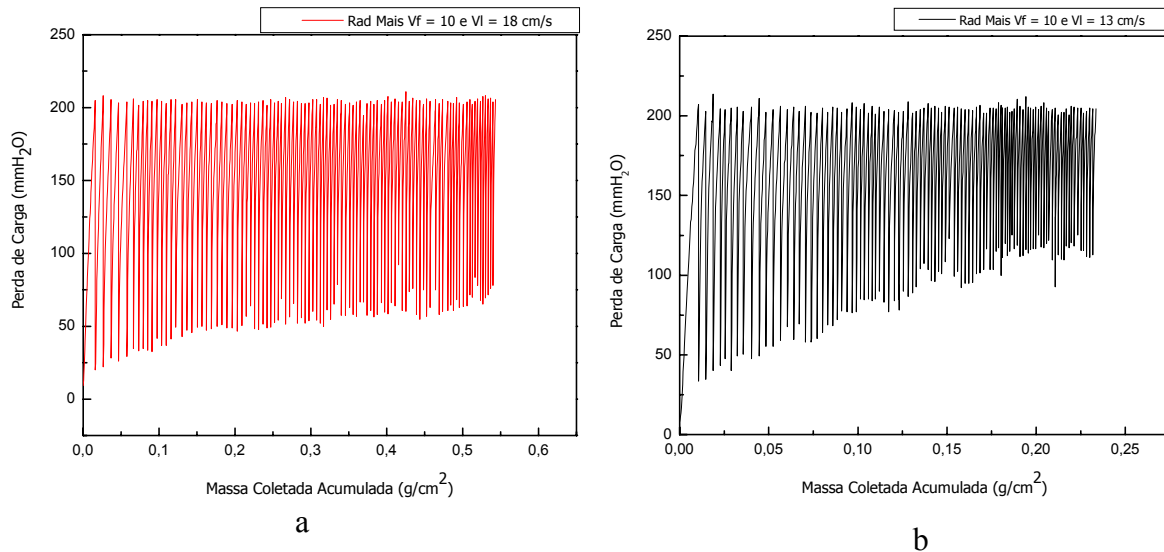


Figura 4.3: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Mais, para Vf de 10 cm/s e Vl de 18 cm/s (a) e Vl de 13 cm/s (b).

Esse comportamento pode ter ocorrido devido a maior eficiência de remoção ocorrida no meio filtrante para a velocidade de limpeza de 13 cm/s, permitindo um menor acúmulo de massa de pó no interior do meio filtrante.

Para compreender melhor o comportamento das curvas de filtração apresentadas nas Figuras 4.3a e 4.3b, foram construídas curvas de massa removida, massa retida acumulada, perda de carga residual em função do número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais.

A Figura 4.4 apresenta a massa de pó removida em função do número de ciclos. Nota-se nesta Figura que após o ciclo 90° , o meio filtrante Rad Mais com Vl de 13 cm/s obteve um comportamento de curva com tendência a estabilizar, o que não foi observado para o mesmo meio filtrante quando a Vl foi de 18 cm/s.

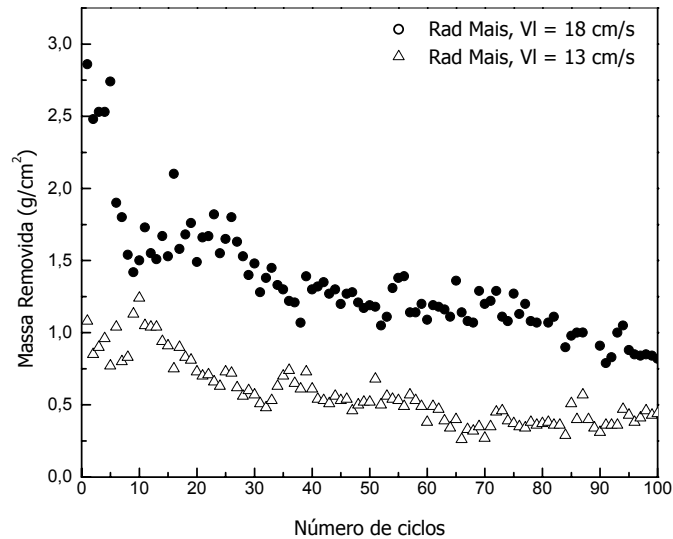


Figura 4.4: Massa removida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.

Também, verifica-se na Figura 4.4 que o meio filtrante Rad Mais para VI de 18 cm/s foi o que removeu a maior quantidade de massa durante o processo de limpeza, obtendo uma queda brusca na massa removida durante os primeiros ciclos de filtração. Sua maior remoção se deve a maior quantidade de massa coletada acumulada, de aproximadamente $0,55 \text{ g/cm}^2$, formando uma torta mais espessa, o que facilitou a remoção das tortas de filtração.

Para a VI de 13 cm/s, a massa removida durante a limpeza foi menor, permanecendo constante nos ciclos finais de filtração.

A Figura 4.5 mostra curvas de massa retida acumulada por número de ciclos. Durante os 100 ciclos de filtração o meio filtrante Rad Mais e VI de 18 cm/s formou uma torta de $2,41 \text{ g/cm}^2$ sendo que para a VI de 13 cm/s a torta formada foi de $2,08 \text{ g/cm}^2$. A formação da torta mais espessa para a VI de 18 cm/s deve-se ao maior acúmulo de partícula nesse meio filtrante.

Nessa Figura observa-se ainda que nos primeiros ciclos de filtração, o meio filtrante, para VI de 18 cm/s, apresentou menor massa retida comparado com o meio filtrante

para VI de 13 cm/s. No entanto, a partir do 10º ciclo, pode ter ocorrido uma saturação do meio filtrante para a VI de 13 cm/s, passando o meio filtrante com VI de 18 cm/s a reter maior quantidade de massa de pó.

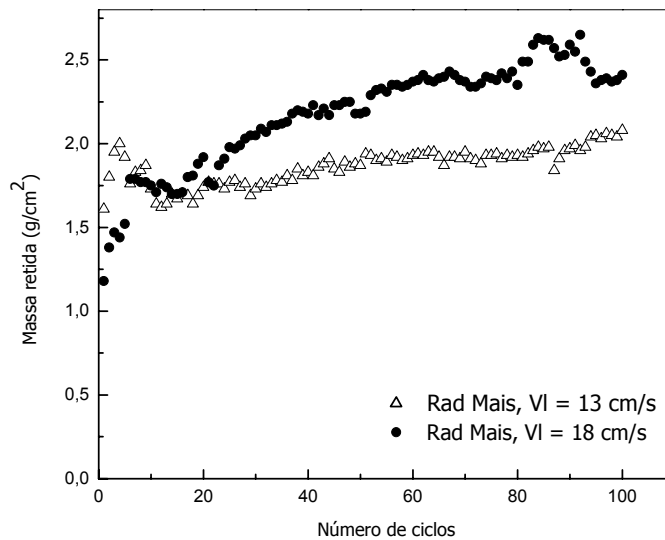


Figura 4.5: Massa retida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para o meio filtrante Rad Mais e VI de 13 cm/s, nota-se que a massa coletada na filtração é quase totalmente removida na limpeza, resultando em um acúmulo de massa muito baixo, tendendo a um comportamento de curva praticamente constante para a massa retida após os 10 ciclos iniciais. Isto mostrou que para a velocidade de limpeza menor o meio filtrante saturou mais rápido.

Observa-se ainda, nessa Figura, para a VI de 13 cm/s, que após o 10º ciclo a quantidade de massa retida varia pouco, de 1,73 g/cm² para o 10º ciclo até 2,08 g/cm² para o 100º. Para o meio filtrante com VI de 18 cm/s houve uma maior variação de massa retida acumulada durante os ciclos de filtração, de 1,75 g/cm² para o 10º ciclo até 2,41 g/cm² para o 100º ciclo.

Esse comportamento também pode ser observado na Figura 4.3a em que o meio filtrante Rad Mais, para V_I de 18 cm/s, acumulou maior quantidade de massa de pó no meio filtrante. Durante os ciclos de filtração, as partículas se sobrepõem umas sobre as outras, podendo ocorrer uma compressão da torta de filtração. Isso também pode ter contribuído para uma maior quantidade de massa retida acumulada para o meio filtrante Rad Mais nessa velocidade, fazendo com que as partículas penetrassem mais no interior do meio filtrante, dificultando sua remoção durante a limpeza.

A Figura 4.6 apresenta a variação da perda de carga residual em função do número de ciclos. Era de se esperar que o meio filtrante com maior massa retida (V_I de 18 cm/s) alcançasse maior perda de carga residual, uma vez que, as partículas remanescentes no meio filtrante após a limpeza, tendem a aumentar a perda de carga do meio filtrante nos ciclos posteriores.

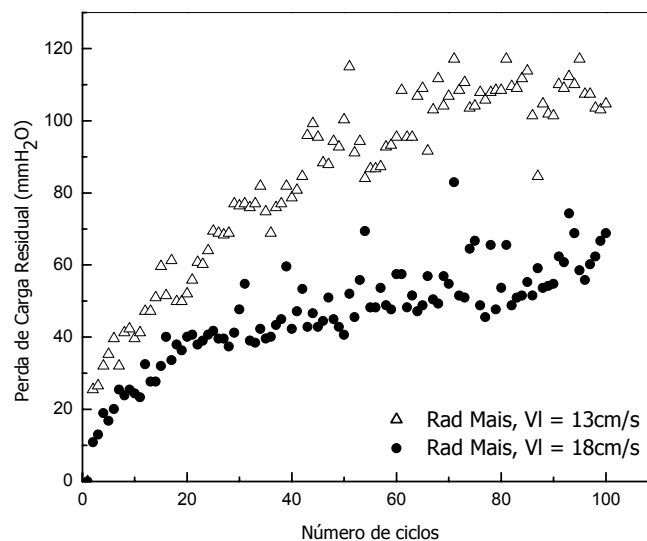


Figura 4.6: Perda de carga residual versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para V_f de 10 cm/s e V_I de 13 cm/s e de 18 cm/s.

Verifica-se, na figura 4.6, que o comportamento da massa retida acumulada refletiu inversamente nos valores de perda de carga residual, uma vez que o meio filtrante que reteve maior massa retida acumulada obteve menor perda de carga residual.

Portanto, o meio filtrante Rad Mais para VI de 18 cm/s, apesar de ter sido o meio filtrante com maior quantidade de massa coletada acumulada, durante o processo de filtração, foi o meio filtrante com maior quantidade de massa removida e de massa retida e menor perda de carga residual. Este resultado pode parecer contraditório, uma vez que a perda de carga residual foi menor para o tecido que apresentou maior massa retida acumulada. Esse comportamento mostrou que a perda de carga residual não é consequência somente do acúmulo de material particulado no interior do meio filtrante, mas também das características do meio filtrante e da velocidade de limpeza.

O mesmo comportamento foi também encontrado no trabalho de Rodrigues (2006) e Rodrigues (2004) para o tecido de polipropileno e no trabalho de Mauschitz (2004), usando tecidos de poliéster, sendo que as partículas remanescentes no interior do meio filtrante, após a limpeza, se ajustam em novas posições na superfície das fibras acarretando uma menor perda de carga residual.

Para melhor verificar esse comportamento, determinou-se a porosidade e a resistência específica da torta de filtração, através da Equação 2.22 e Equação 2.14 respectivamente. Os resultados estão apresentados na Figura 4.7 e 4.8.

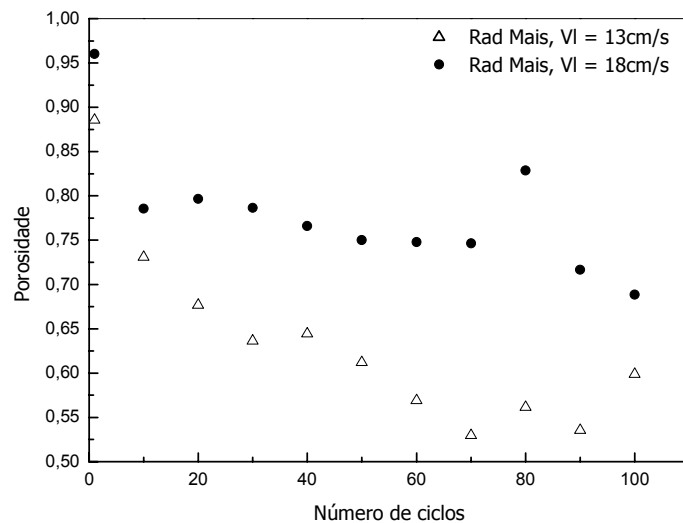


Figura 4.7: Porosidade versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.

Observa-se na Figura 4.7 que o comportamento da perda de carga residual pode ser justificado, porque o meio filtrante Rad Mais para VI de 13 cm/s, com menor massa retida e massa removida, foi o que apresentou tortas de filtração com menor porosidade. Este fato pode ser explicado devido a maior compactação da torta durante os ciclos de filtração, causando uma maior resistência ao escoamento do fluido aumentando sua perda de carga residual. A Figura 4.8 confirma tal explicação, uma vez que o meio filtrante Rad Mais para VI de 13 cm/s, também apresentou maior resistência específica da torta.

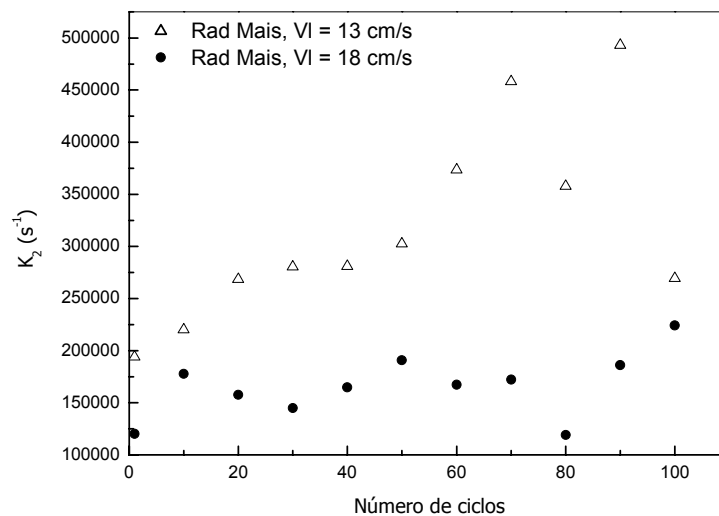


Figura 4.8: Resistência específica da torta versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.

A eficiência de remoção em relação aos números de ciclos está apresentada na Figura 4.9. As curvas de eficiência de remoção apresentaram o mesmo comportamento das curvas de massa removida apresentadas na Figura 4.4.

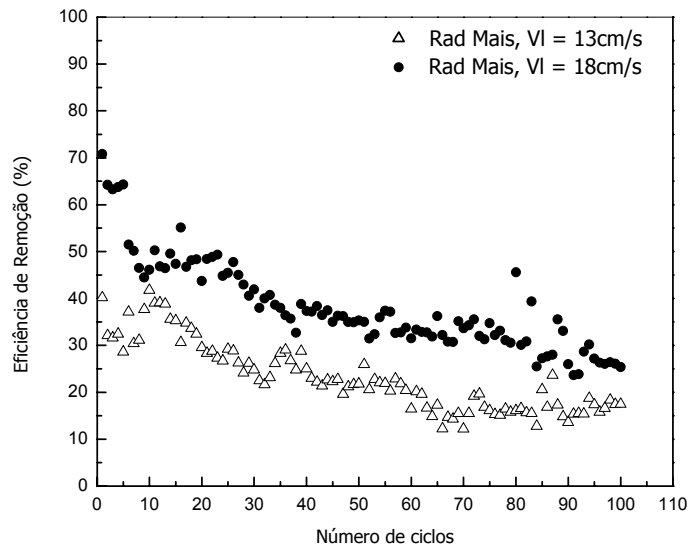


Figura 4.9: Eficiência de remoção versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e de 18 cm/s.

Observa-se na Figura 4.9 que o meio filtrante Rad Mais com maior velocidade de limpeza, VI de 18 cm/s, como era de se esperar, foi o que obteve maior eficiência de remoção durante todo o processo de filtração. Conforme mostra as Figuras 4.3a e 4.4, o meio filtrante Rad Mais para VI de 18 cm/s alcançou valores maiores de massa coletada acumulada e massa removida, justificando assim sua maior eficiência de remoção da torta. No entanto, o meio filtrante Rad Mais para VI de 13 cm/s desde o primeiro ciclo de filtração alcançou valores baixos de eficiência de remoção de tortas de filtração.

4.3.2 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Plus

Para esse estudo, a velocidade de filtração também foi mantida constante, durante todos os ciclos de filtração, em 10 cm/s. Também foram utilizadas duas velocidades de limpeza de 13 cm/s e de 18 cm/s e perda de carga máxima de 200 mmH₂O. As características do meio

filtrante Rad Plus são: permeabilidade de $110 \text{ L/m}^2\text{sec}$, espessura de $350 \mu\text{m}$ e tamanho médio de poros de $31 \mu\text{m}$.

Os gráficos de perda de carga em função da massa coletada acumulada durante os 100 ciclos de filtração e limpeza foram traçados para o meio filtrante Rad Plus para essas condições experimentais e estão apresentados nas Figuras 4.10a e 4.10b.

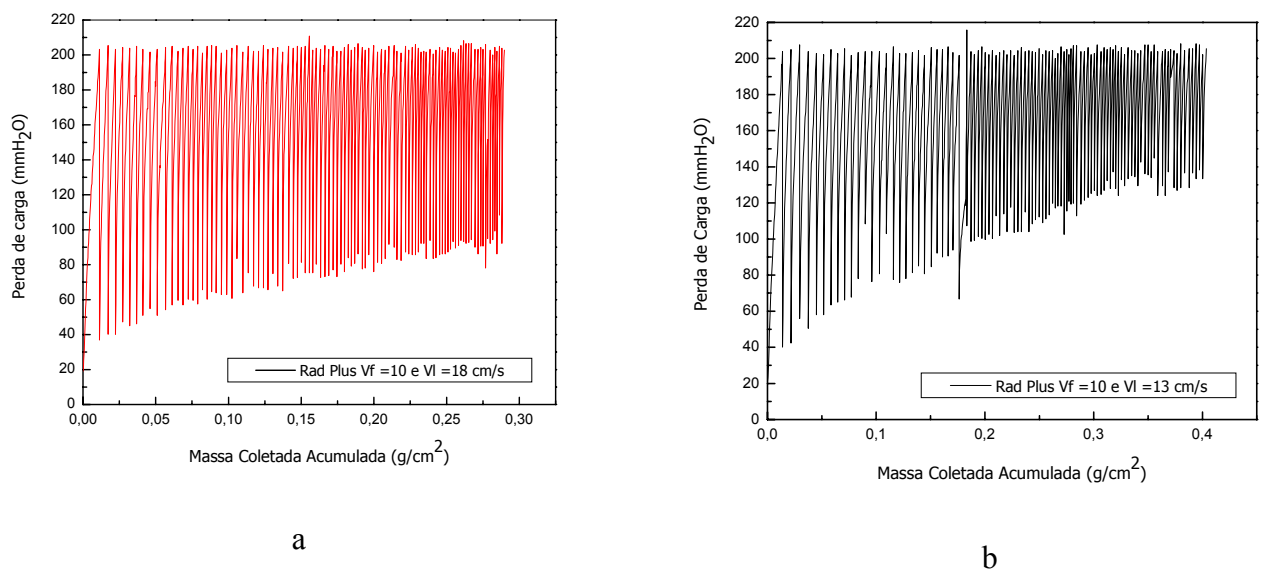


Figura 4.10: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Plus para V_f de 10 cm/s , V_l de 18 cm/s (a), e V_l de 13 cm/s (b).

A Figura 4.10a mostra que o meio filtrante Rad Plus com V_l de 18 cm/s , apesar de ter apresentado uma maior duração dos ciclos de filtração, acumulou uma menor massa de pó, aproximadamente $0,28 \text{ g/cm}^2$, tendendo a permanecer constante a partir de $0,25 \text{ g/cm}^2$. Para o mesmo meio filtrante com V_l de 13 cm/s , conforme mostra a Figura 4.10b, o meio filtrante teve um acúmulo de massa de aproximadamente $0,40 \text{ g/cm}^2$ e não apresentou tendência de estabilizar os valores de perda de carga.

As curvas de massa removida, massa retida acumulada e perda de carga residual em função do número de ciclos foram traçadas para o meio filtrante Rad Plus e estão apresentadas nas Figuras 4.11 a 4.13.

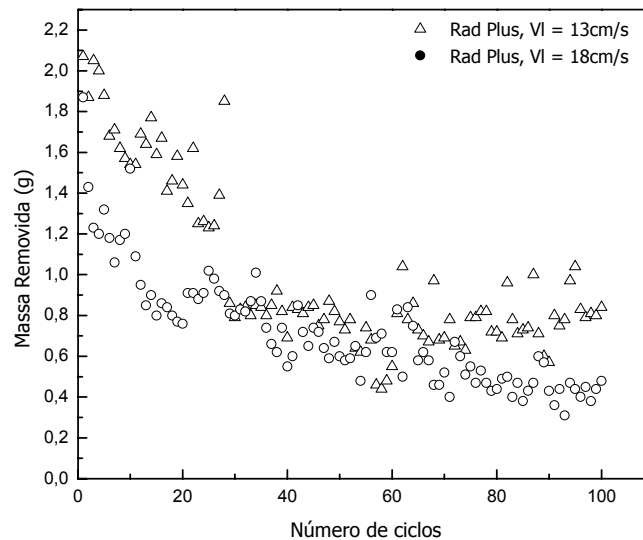


Figura 4.11: Massa removida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para V_f de 10 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s.

Observa-se na Figura 4.11, de massa removida em função do número de ciclos, que o meio filtrante Rad Plus para V_l de 13 cm/s removeu maior quantidade de partículas durante o processo de limpeza do meio filtrante. A Figura 4.10 mostrou que o meio filtrante Rad Plus para V_l de 13 cm/s acumulou maior massa, aproximadamente $0,4 \text{ g/cm}^2$, formando uma torta de pó mais espessa, conseqüentemente, facilitou a remoção das partículas durante a limpeza. As curvas de massa removida para o meio filtrante Rad Plus com V_l de 13 cm/s apresentaram tendência a permanecer constante nos ciclos finais, não sendo este comportamento observado para a V_l de 18 cm/s. Este comportamento para a V_l de 18 cm/s indica que os 100 ciclos de filtração não foram suficientes para ocorrer à saturação do meio filtrante.

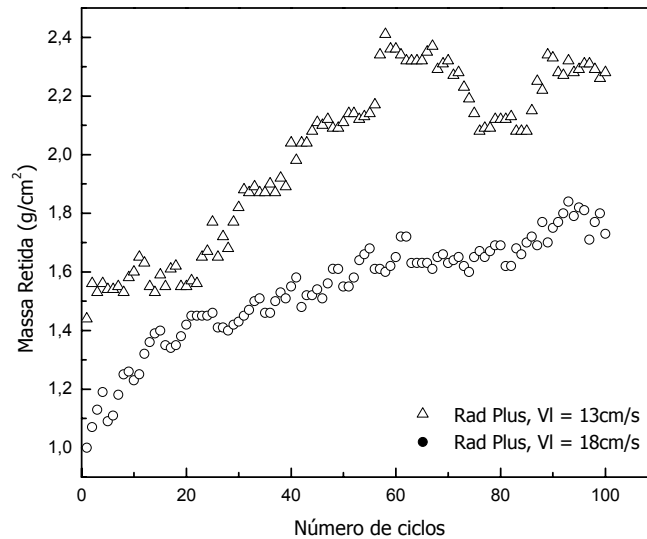


Figura 4.12: Massa retida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para V_f de 10 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s.

Verifica-se na Figura 4.12, que durante os 100 ciclos de filtração, o meio filtrante Rad Plus para V_l de 18 cm/s acumulou uma massa de 1,73 g/cm² e para a V_l de 13 cm/s a massa acumulada foi maior, de 2,30 g/cm². A formação de tortas mais espessas para a V_l de 13 cm/s foi devido ao maior acúmulo de partícula nesse meio filtrante.

Durante os 20 ciclos iniciais o meio filtrante Rad Plus com V_l de 13 cm/s reteve poucas partículas, obtendo um comportamento de curva quase constante. Isto é possível, uma vez que as partículas coletadas durante o processo de filtração, eram praticamente removidas durante a limpeza. Após o 20º ciclo, o meio filtrante Rad Plus com V_l de 13 cm/s teve um aumento considerável de massa retida, aumentando de 1,55 g/cm² do 20º ciclo para 2,30 g/cm² para o 100º ciclo. Isto pode ter ocorrido devido uma maior compactação da torta, sendo a V_l de 13 cm/s pouco eficiente para remover as partículas no interior do meio filtrante.

Para o meio filtrante Rad Plus com V_l de 18 cm/s, observa-se um aumento mais acentuado da quantidade de partículas retidas nos 20 primeiros ciclos de filtração. Após o 20º ciclo, nota-se um aumento menor na quantidade de partículas retidas, de 1,42 g/cm² para 1,73

g/cm^2 no 100º ciclo. Isto acontece devido à saturação do tecido, ou seja, as partículas acumuladas no meio filtrante após os primeiros ciclos de filtração, eram em grande parte removidas durante a limpeza.

A Figura 4.13 apresenta o comportamento da perda de carga residual em função do número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus. O meio filtrante com maior quantidade de partículas retidas no interior do meio filtrante, foi o que obteve a perda de carga residual maior, ao contrário do que foi observado para o Rad Mais.

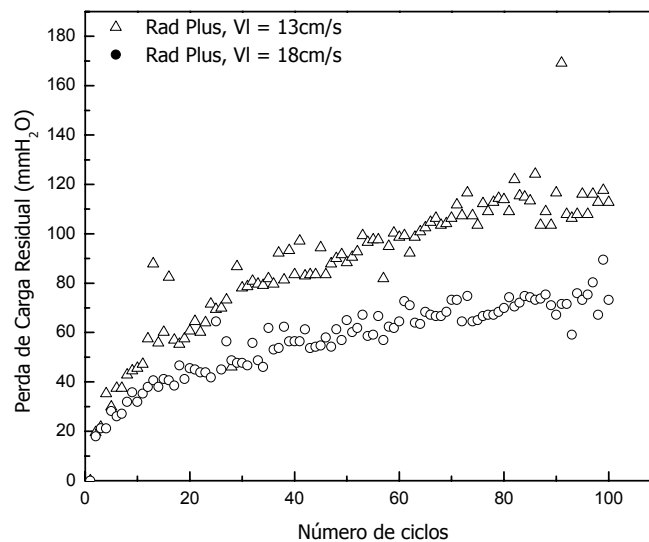


Figura 4.13: Perda de carga residual versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

O maior valor de perda de carga residual, para meio filtrante Rad Plus com VI de 13 cm/s, deve-se a uma redução na duração dos ciclos de filtração.

Determinou-se a porosidade da torta de filtração durante vários ciclos de filtração e os resultados estão apresentados na Figura 4.14.

Observa-se na Figura 4.14 que os valores de porosidade foram próximos, porém um pouco menor para o meio filtrante Rad Plus com VI de 18 cm/s, o oposto do que era esperado

devido os valores de perda de carga terem sido menores do que para o meio filtrante Rad Plus com V_f de 13 cm/s. Portanto, a porosidade da torta não foi o fator dominante que influenciou nos valores de perda de carga residual.

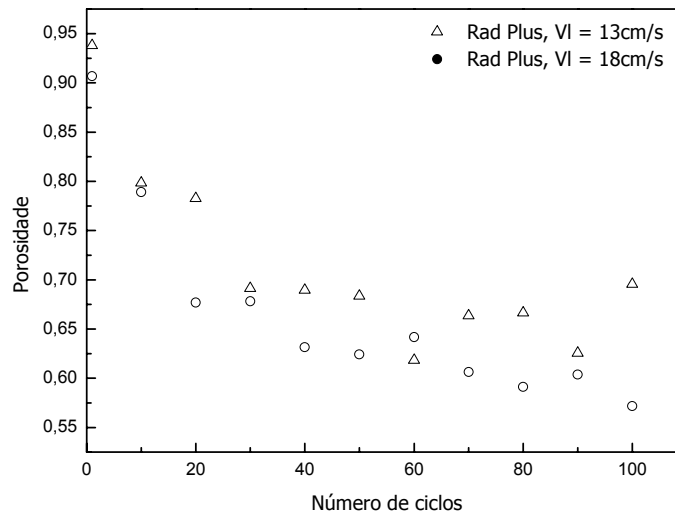


Figura 4.14: Porosidade versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para V_f de 10 cm/s e V_i de 13 cm/s e 18 cm/s.

A porosidade tende a diminuir ciclo a ciclo, porque há maior compactação da torta com o aumento do número de ciclos, diminuindo a porosidade da torta. Esta observação não ocorreu para a V_i de 13 cm/s, pois a porosidade aumentou com o número de ciclos.

Ito (2002) estudou a porosidade de tortas de filtração para o primeiro ciclo de filtração, encontrando valor de porosidade igual a 0,42. O meio filtrante utilizado foi um feltro de poliéster, rocha fosfática de diâmetro volumétrico de 14,53 μm , para V_f de 10 cm/s e $\Delta P_{\text{máxima}}$ de 780,72 mmH₂O. No entanto, nota-se na Figura 4.14 que trabalhando com meios filtrantes de celulose, os valores de porosidade encontrados foram bem mais altos do que os valores obtidos por Ito (2002). A perda de carga máxima foi maior no trabalho de Ito, o que pode ter influenciado na porosidade da torta para o primeiro ciclo de filtração. Outro fator

estudado foi à variação da resistência específica da torta em relação ao número de ciclos. Este comportamento é mostrado na Figura 4.15.

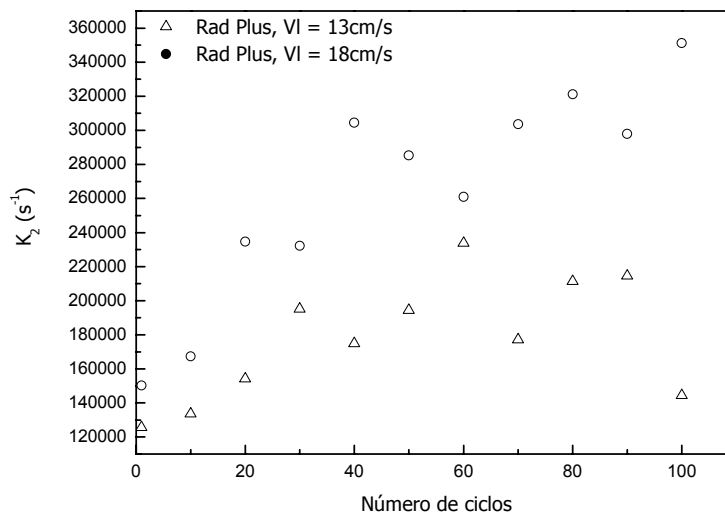


Figura 4.15: Resistência específica da torta versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.

Nota-se na Figura 4.15 uma grande variação dos valores de K_2 . A menor resistência específica da torta para o meio filtrante Rad Plus com Vl de 13 cm/s também não justificou a maior perda de carga residual obtida para o este meio filtrante. Outros fatores relacionados com as características do meio filtrante podem ter interferido nos valores de perda de carga residual encontrados para este meio filtrante.

A Figura 4.16 mostra curvas da eficiência de remoção da torta em função do número de ciclos. Nota-se nessa figura um comportamento bem próximo das curvas para o meio filtrante Rad Plus nas duas velocidades de limpeza.

O meio filtrante Rad Plus com Vl de 13 cm/s tendeu a estabilizar a partir dos últimos ciclos, não sendo este comportamento observado para o mesmo meio filtrante com Vl de 18 cm/s.

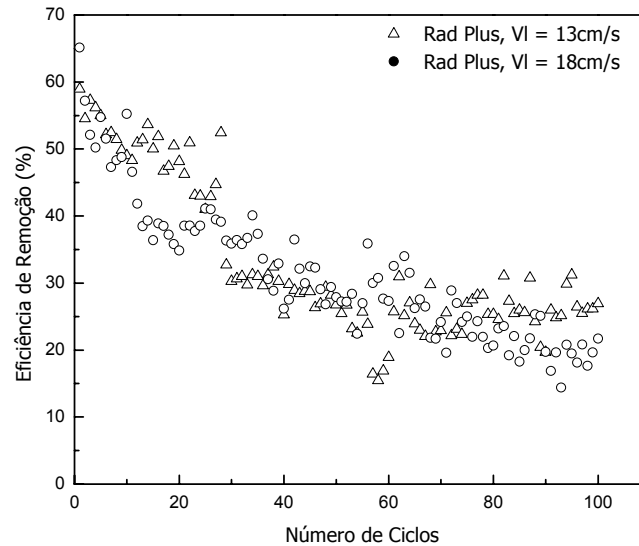


Figura 4.16: Eficiência de remoção versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Analisando a Figura 4.10, nota-se que o meio filtrante com maior massa acumulada coletada foi Rad Plus para VI de 13 cm/s, sendo este o que removeu maior quantidade de torta durante a limpeza, como indicado na Figura 4.11 e obteve mesma eficiência de remoção que a VI de 18 cm/s.

4.3.3 – Comparação do comportamento do meio filtrante Rad Plus e Rad Mais com Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s

A Figura 4.17 mostra as curvas do primeiro ciclo de filtração formada nas mesmas condições experimentais, para os dois meios filtrantes. Estas curvas foram traçadas para uma melhor observação do comportamento inicial de filtração.

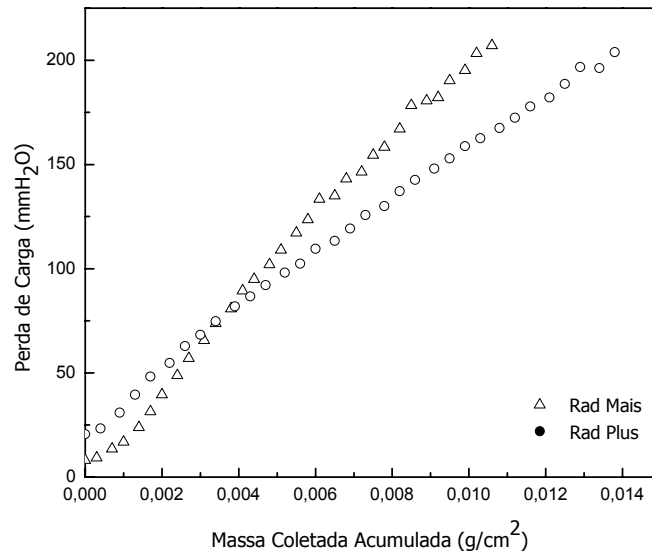


Figura 4.17: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Plus e Rad Mais durante o primeiro ciclo de filtração.

Observa-se na Figura 4.17, o comportamento da filtração interna, onde ocorre a impregnação de pó no meio filtrante. Essa impregnação é realizada através da maior penetração de partículas no interior das fibras que compõe o meio filtrante, levando a formação mais lenta da torta de filtração. Esse comportamento pode ser verificado através da primeira curva de filtração para os meios filtrante Rad Mais e Rad Plus, apresentados nessa figura. Para o meio filtrante Rad Plus o período de filtração interna foi menor ou quase inexistente, sendo que a curva apresentou um comportamento praticamente linear. Este comportamento resulta em uma filtração superficial, em que a impregnação de pó no interior do tecido foi quase inexistente. A filtração superficial tem a característica de acumular maior quantidade de partículas na superfície do meio filtrante, durante o processo de filtração, conseqüentemente, a remoção das partículas durante a limpeza é mais fácil.

Conforme mostrou a Tabela 3.1 a maior permeabilidade do Rad Mais resultou em um período mais evidente de filtração interna, como pode ser verificado na Figura 4.17, com a existência de uma curva convexa nos primeiros instantes de filtração.

Callé (2002), comparando o comportamento das curvas de filtração de um meio filtrante de fibras de poliéster tratado, com um de fibras de celulose, verificou que o tecido de poliéster tratado apresentou um maior período de filtração interna que o meio filtrante de celulose.

Foram construídas as curvas de massa removida, massa retida acumulada, perda de carga residual em função do número de ciclos para a comparação dos meio filtrante Rad Mais e Rad Plus, para VI de 13 cm/s e VI de 18 cm/s.

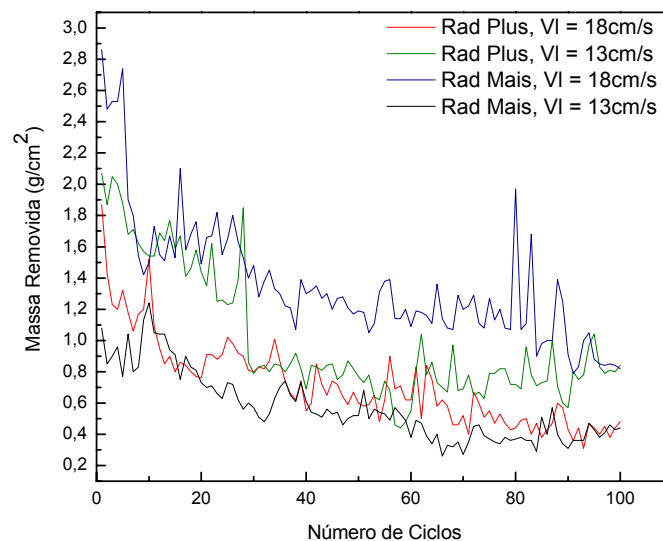


Figura 4.18: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad

Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para meio filtrante Rad Mais, que é mais poroso e mais permeável do que o Rad Plus, conforme indica a Tabela 3.1, a quantidade de massa de partículas removida foi maior para VI de 18 cm/s, isso porque a força de remoção aplicada no meio filtrante, provocada por essa velocidade de limpeza conseguiu remover as partículas mais internas retidas nas fibras. Outro fator que justifica a maior remoção de torta é que o meio filtrante Rad Mais nessa velocidade de limpeza acumulou maior quantidade de massa coletada durante os 100 ciclos de filtração e limpeza, ocorrendo à formação de uma torta de filtração mais espessa o que também facilitou a

remoção da torta. Este comportamento pode ser observado quando se compara as Figura 4.3 e 4.10 de perda de carga em função da massa coletada acumulada, a qual mostra o maior acúmulo de massa para o meio filtrante Rad Mais.

Para a VI de 13 cm/s, o meio filtrante Rad Mais, apresentou um resultado contrário à VI de 18 cm/s, onde o meio filtrante Rad Mais removeu menor quantidade de massa do que o meio filtrante Rad Plus. Esse comportamento pode ser explicado porque o meio filtrante Rad Plus, sendo menos poroso e menos permeável do que o Rad Mais, como mostra a Tabela 3.1, permitiu a formação de tortas na superfície do meio filtrante. Dessa forma, uma força de remoção menor foi capaz de remover maior quantidade de torta formada na superfície do filtro.

Esses resultados mostraram, portanto que a VI de 13 cm/s não foi suficiente para remover as partículas no interior do meio Rad Mais, mas foi suficiente para remover maiores quantidades de partículas da superfície do meio filtrante Rad Plus.

As curvas de massa retida acumulada foram estudadas para os dois meios filtrantes e estão apresentadas na Figura 4.19.

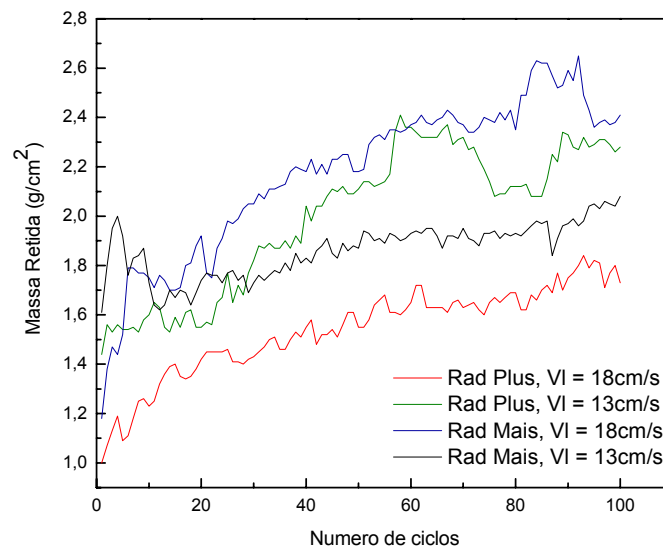


Figura 4.19: Massa retida versus número de ciclos para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Nota-se nessa Figura que, para a VI de 18 cm/s, o meio filtrante Rad Mais reteve maior massa de pó quando comparado com o meio filtrante Rad Plus. Este comportamento pode ser explicado devido ao maior período de filtração interna do meio filtrante Rad Mais, conforme apresentado na Figura 4.17, e também devido a sua maior permeabilidade. Esta característica do meio filtrante Rad Mais fez com que as partículas de pó, penetrassem mais no interior das fibras que compõe o meio filtrante, levando a formação mais lenta da torta de filtração e conseqüentemente retendo mais massa no interior do meio filtrante.

Comparando o meio filtrante Rad Mais e Rad Plus para a VI de 13 cm/s, verifica-se que o meio filtrante Rad Mais obteve maiores valores de massa retida até o 30º ciclo. Após o 30º ciclo este comportamento se inverteu, sendo que o meio filtrante Rad Plus passou a reter maior quantidade de massa de pó. Como justificado anteriormente, o maior tempo de filtração para meio filtrante Rad Mais justifica sua maior retenção de partículas até o 30º ciclo. Após o 30º ciclo pode ter ocorrido uma saturação do meio filtrante, ou seja, a massa coletada na filtração foi praticamente removida na limpeza, resultando em um acúmulo de massa menor, tendendo a um comportamento de curva quase constante. Portanto, isso levou a VI de 13 cm/s a ser mais eficiente na remoção das partículas do meio filtrante Rad Plus do que para o meio filtrante Rad Mais.

A curva com os valores de perda de carga residual está apresentada na Figura 4.20 para os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus.

Conforme apresentado na Figura 4.20, o meio filtrante Rad Mais para VI de 18 cm/s obteve valores um pouco menores de perda de carga residual do que o meio filtrante Rad Plus para a mesma velocidade de limpeza.

Observa-se na Figura 4.20 que os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para VI de 13 cm/s, obtiveram o mesmo comportamento de curva não ocorrendo variação considerável da perda de carga residual. Ambos os meios filtrantes tenderam estabilizar a perda de carga residual após o ciclo 80. Os picos distantes da linha de tendência são considerados alguma alteração ocorrida das variáveis durante os experimentos.

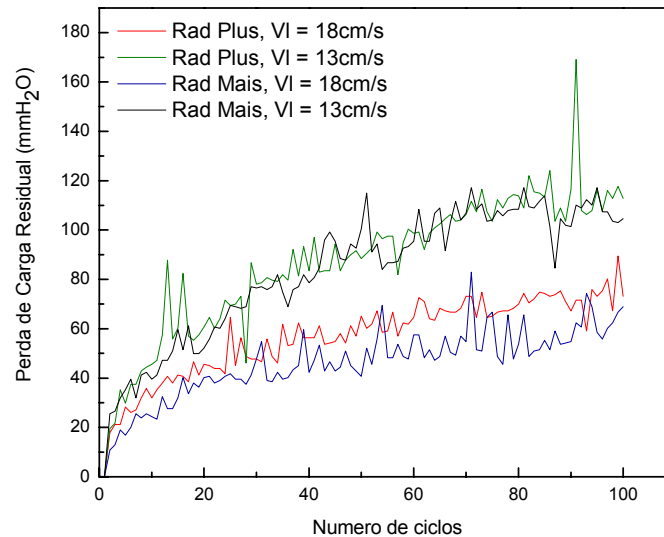


Figura 4.20: Perda de carga residual versus número de ciclos para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Rodrigues (2004) em um estudo da comparação de tecidos de poliéster tratado e não tratado mostrou que a perda de carga residual, para o tecido tratado, que tem menor porosidade e menor permeabilidade, estabilizou a partir do quinto ciclo, sendo que para o meio filtrante de celulose este comportamento não foi observado.

Nas indústrias, os meios filtrantes são avaliados pelo comportamento das curvas de perda de carga residual, portanto neste experimento, a perda de carga não foi um bom parâmetro para analisar qual melhor meio filtrante. Como apresentado na Figura 4.20, os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus que apresentaram valores diferentes de massa removida e massa retida acumulada obtiveram praticamente o mesmo comportamento de perda de carga residual. A Figura 4.21 apresenta as curvas de eficiência de remoção para os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus para Vf de 10 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

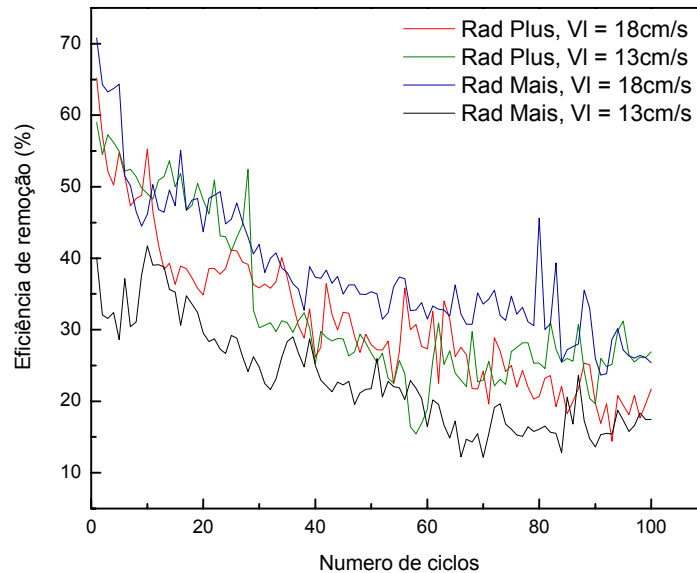


Figura 4.21: Eficiência de remoção versus número de ciclos para os meios filtrantes Rad Plus e Rad Mais para V_f de 10 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s.

A eficiência de remoção da torta teve o comportamento esperado, porque o meio filtrante Rad Mais para V_l de 18 cm/s, com maior massa coletada acumulada e maior massa removida foi o que alcançou maior valor de eficiência de remoção.

Para essas condições experimentais poder-se-ia escolher como melhor meio filtrante o Rad Mais com V_l de 18 cm/s, sendo este meio filtrante o que acumulou mais massa, removeu mais torta de filtração, reteve maior massa e obteve menor perda de carga residual durante os 100 ciclos de filtração e limpeza.

4.4 - Investigação para o meio filtrante Rad Mais e Rad Plus para a velocidade de filtração de 5 cm/s

2ª Parte Experimental

Os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus também foram investigados para a velocidade de filtração (V_f) de 5 cm/s durante os 100 ciclos de filtração. Foram utilizadas duas velocidades de limpeza (V_l) de 13 cm/s e 18 cm/s e em todos os testes, a queda de pressão máxima foi mantida em 100 mmH₂O.

4.4.1 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Mais

A Figura 4.22 apresenta a variação da perda de carga em função da massa coletada durante os 100 ciclos de filtração e limpeza, para o meio filtrante Rad Mais com V_f de 5 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s.

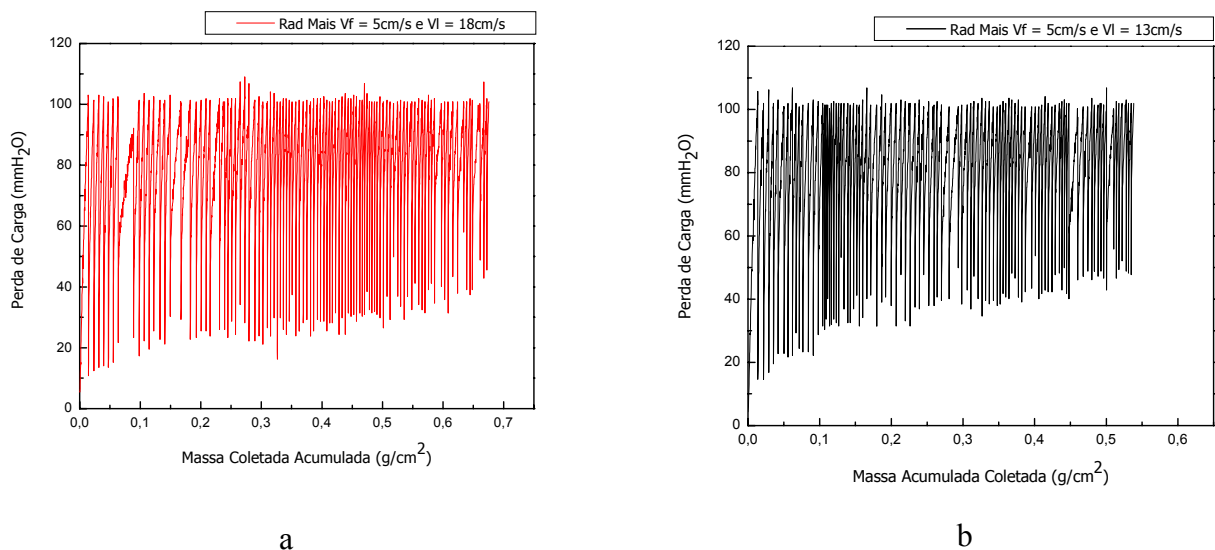


Figura 4.22: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Mais com V_f de 5 cm/s e V_l de 18 cm/s (a) e V_l de 13 cm/s (b).

O meio filtrante Rad Mais com VI de 18 cm/s foi o que obteve maior quantidade de massa coletada acumulada durante o processo de filtração e limpeza. Conforme indica a Figura 4.22a o meio filtrante teve um acúmulo de massa de aproximadamente $0,70 \text{ g/cm}^2$, bem acima do observado para o teste com Vf de 10 cm/s e ΔP de 200 mmH₂O, mostrado na Figura 4.10a. Nessas condições experimentais não ocorreu tendência a estabilizar, como apresentou para a condição mostrada na Figura 4.10a. O meio filtrante Rad Mais com VI de 13 cm/s, apresentou a formação de uma torta mais compacta devido a menor duração dos ciclos de filtração, acumulando aproximadamente $0,55 \text{ g/cm}^2$ de pó. Para esta condição o acúmulo de massa de pó foi maior para as duas velocidades de limpeza do que para o teste com Vf de 10 cm/s e ΔP de 200 mmH₂O, como mostrou a Figura 4.3.

As curvas de massa removida, massa retida e perda de carga residual para o meio filtrante Rad Mais com VI de 13 cm/s e de 18 cm/s estão apresentadas na Figura 4.23 a 4.25.

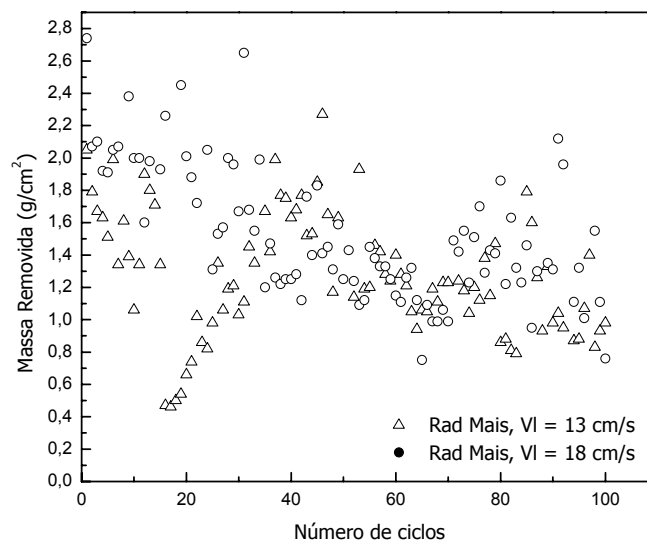


Figura 4.23: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Verifica-se um comportamento semelhante de curva para o meio filtrante Rad Mais com VI de 13 cm/s e de 18 cm/s, não apresentando tendência a estabilizar. Para a VI de 13 cm/s

teve uma queda considerada de massa removida nos primeiros ciclos de filtração, o que não ocorreu para a V_f de 18 cm/s. Esta queda é consequência de um menor tempo de duração dos ciclos de filtração, sendo que uma menor quantidade de partículas foi necessária para atingir a perda de carga do sistema, resultando em uma menor massa de pó removida durante o processo de remoção da torta.

Para a V_f de 5 cm/s, o tempo de filtração variou em alguns ciclos de filtração quando comparado com a V_f de 10 cm/s. Os pontos mais afastados das curvas são devido ao tempo de filtração mais longo, acarretando em uma maior quantidade de massa coletada no meio filtrante e consequentemente em uma maior massa removida durante a limpeza. Esta diferença na duração dos ciclos de filtração pode ter sido decorrente de algum parâmetro experimental diferente, como por exemplo, do sugador.

Observa-se ainda que durante os 100 ciclos de filtração o meio filtrante Rad Mais para V_f de 18 cm/s formou uma torta mais espessa, de $2,71 \text{ g/cm}^2$, sendo que para a V_f de 13 cm/s a torta formada foi de $2,59 \text{ g/cm}^2$. A formação da torta mais espessa para a V_f de 18 cm/s deve-se ao maior acúmulo de partícula para este meio filtrante nos ciclos finais de filtração. O maior acúmulo de partículas para a V_f de 18 cm/s, a partir do ciclo 90, deve-se a uma maior compactação da torta, sendo esta velocidade pouco eficiente para remover as partículas mais internas no meio filtrante.

Para a V_f de 13 cm/s, a partir do ciclo 50, o meio filtrante obteve pouca variação nos valores de massa retida, sendo de 2,32 g para o ciclo 50 e de 2,59 g para o ciclo 100. Este comportamento pode ser explicado pela maior compactação e penetração das partículas de pó, ocorrendo à saturação do meio filtrante. Já para a V_f de 18 cm/s, nota-se um aumento considerado de massa retida, principalmente a partir do ciclo 80 sendo de 2,00 g para o ciclo 80 e de 2,71 g para o ciclo 100, ocorrendo à formação de torta mais espessa.

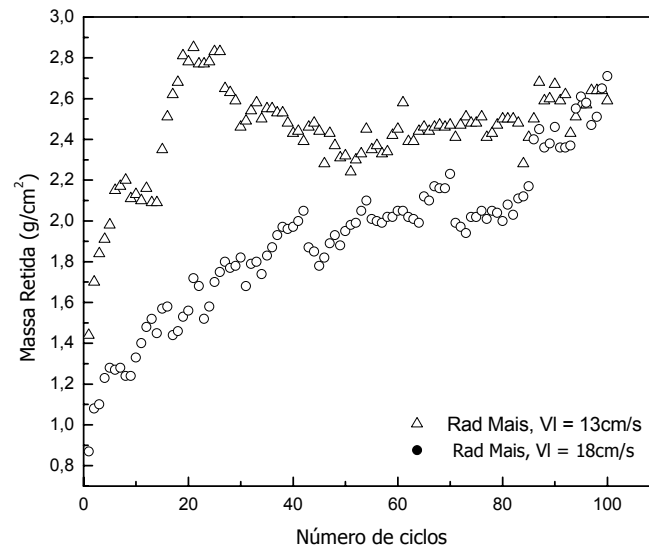


Figura 4.24: Massa retida versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

O teste com meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e ΔP de 200 mmH₂O, também apresentou a formação de torta mais espessa para a VI de 18 cm/s, devido ao maior acúmulo de partícula para esta velocidade.

A Figura 4.25 apresenta a perda de carga residual em função do número de ciclos. Verifica-se que para o meio filtrante Rad Mais, a massa retida influenciou diretamente no aumento da perda de carga residual, porque o meio filtrante com VI de 13 cm/s, que apresentou maior massa retida, foi o que obteve maior perda de carga residual durante os 100 ciclos de filtração.

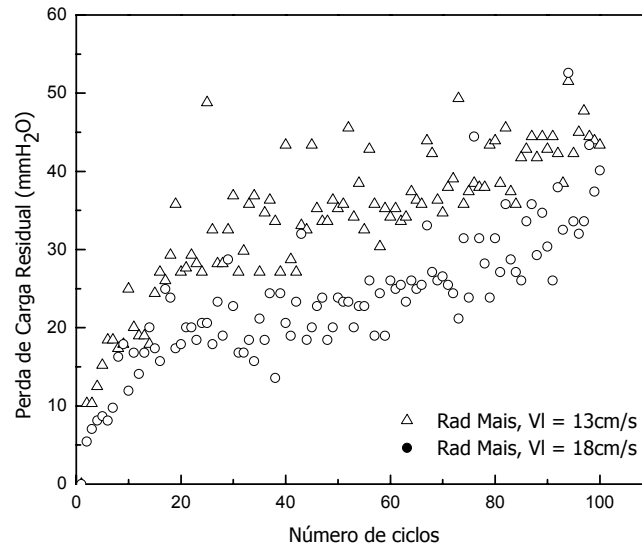


Figura 4.25: Perda de carga residual versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Apesar dos valores de perda de carga residual para a VI de 13 cm/s apresentarem-se de forma dispersa, nota-se que nos ciclos finais, o meio filtrante apresentou tendência a estabilizar estes valores, o que não ocorreu para a VI de 18 cm/s.

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam, respectivamente, a variação da porosidade e da resistência específica da torta de filtração em função do número de ciclos. Observa-se na Figura 4.26 uma maior variação dos valores de porosidade para o meio filtrante Rad Mais com VI de 13 cm/s. Este comportamento pode ser justificado pela variação dos valores de massa retida e perda de carga residual para este meio filtrante.

Nota-se na Figura 4.26 que a porosidade diminui do primeiro ciclo em relação ao último. Observa-se que os valores de porosidade oscilam, diminuindo e aumentando, o que não era esperado. Este comportamento pode ter ocorrido devido à variação na vazão de alimentação de pó durante o processo de filtração.

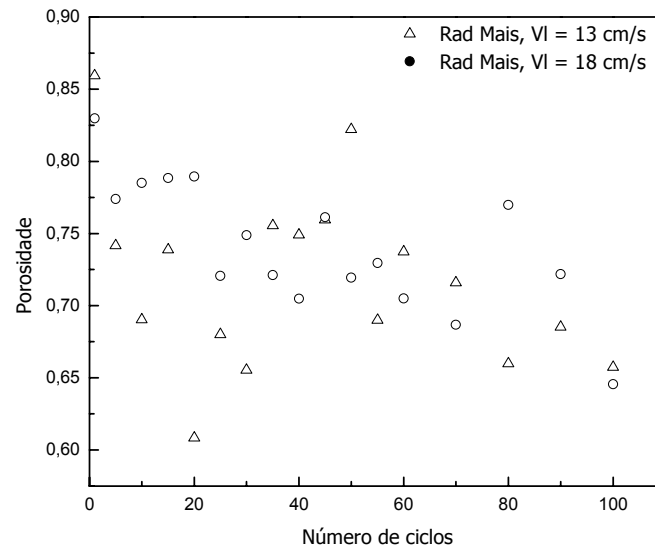


Figura 4.26: Porosidade versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com V_f de 5 cm/s e V_I de 13 cm/s e 18 cm/s.

Negrini (2000), calculou a porosidade para diferentes espessuras de tortas em meio filtrante de poliéster de gramatura 534 g/cm^3 . Para uma torta com massa total por unidade de área de $0,014 \text{ g/cm}^2$ ela encontrou um valor de porosidade média de 0,63. Neste experimento, o primeiro ciclo de filtração correspondeu a uma massa total por unidade de área também de $0,014 \text{ g/cm}^2$. No entanto, nota-se na Figura 4.26 que para as V_I de 13 cm/s e de 18 cm/s, os valores de porosidade encontrados foram 0,86 e 0,83, respectivamente. Esses valores foram bem mais altos do que os valores obtidos por Negrini (2000). Entretanto, verifica-se que para os ciclos subsequentes os valores de porosidade, ficaram próximos aos observados por Negrini (2000).

A resistência específica da torta apresentou um comportamento oposto ao encontrado para a porosidade da torta, o que era esperado, pois, à medida que a porosidade aumenta a resistência à passagem do fluxo de gás através da torta de filtração também aumenta, diminuindo a resistência específica da torta. Este comportamento pode ser observado comparando as Figuras 4.26 e 4.27, sendo que à medida que a porosidade aumenta a resistência específica da torta diminui.

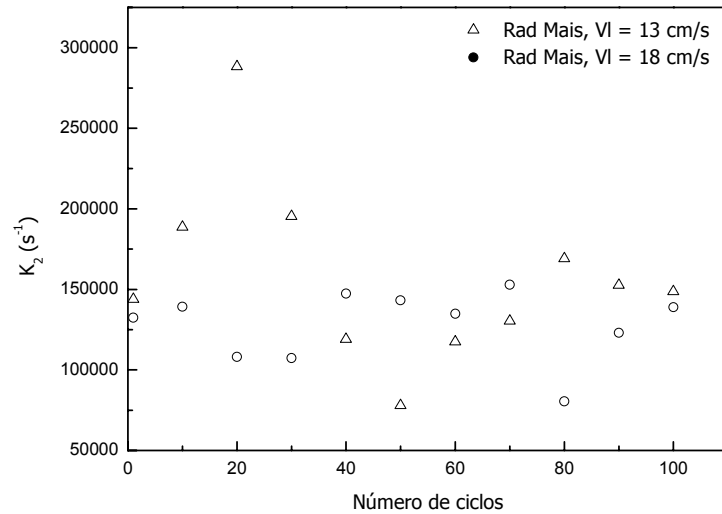


Figura 4.27: Resistência específica da torta versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Apesar da porosidade diminuir do primeiro para o último ciclo, observa-se nesta figura que os valores de resistência específica da torta foram próximos nestes ciclos de filtração.

A Figura 4.28 apresenta o comportamento da eficiência de remoção em função do número de ciclos.

A curva de eficiência de remoção da torta teve um comportamento semelhante à curva de massa removida. Nota-se que o meio filtrante Rad Mais com VI de 18 cm/s alcançou valores mais altos de eficiência durante os ciclos iniciais de filtração. Para nenhuma das velocidades de limpeza a curva apresentou tendência a estabilizar. Os valores encontrados para a eficiência de remoção nas duas velocidades de limpeza foram próximos nos ciclos finais.

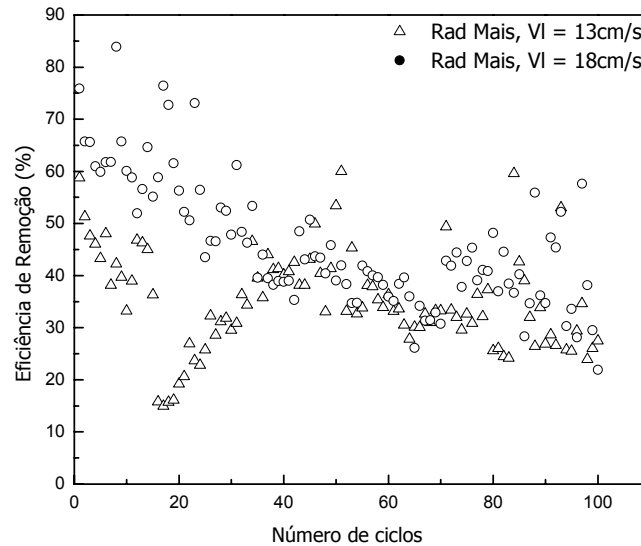


Figura 4.28: Eficiência de remoção versus número de ciclos para o meio filtrante Rad Mais com V_f de 5 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s.

De acordo com as Figuras 4.22 e 4.23, o meio filtrante Rad Mais para V_l de 18 cm/s teve um maior acúmulo de massa e maior massa removida, o que pode justificar a maior eficiência de remoção para a V_l de 18 cm/s.

Para o experimento com V_f de 10 cm/s o meio filtrante Rad Mais com V_l de 13 cm/s também apresentou menor eficiência de remoção do que a V_l de 18 cm/s.

4.4.2 – Estudo do comportamento do meio filtrante Rad Plus

A Figura 4.29 mostra o comportamento da massa coletada acumulada em função da perda de carga para o meio filtrante Rad Plus com V_f de 5 cm/s e V_l de 13 cm/s e 18 cm/s

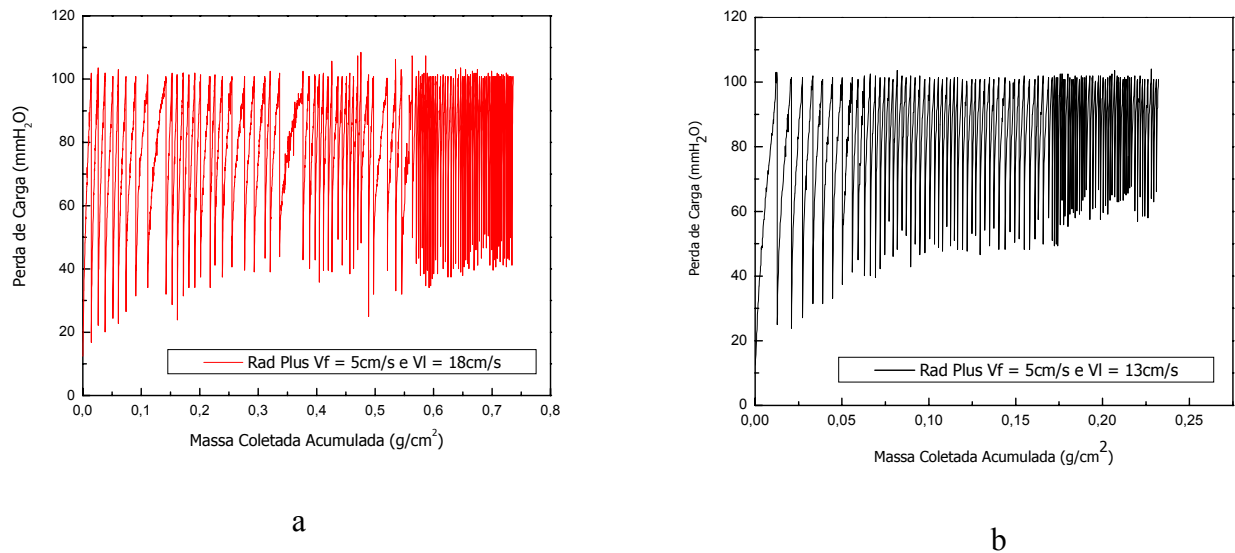


Figura 4.29: Perda de carga em função da massa acumulada para o meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 18 cm/s (a), VI de 13 cm/s (b)

Para VI de 18 cm/s o meio filtrante Rad Plus apresentou ciclos de filtração mais longos obtendo uma maior quantidade de massa coletada de $0,73 \text{ g/cm}^2$ sendo que para a VI de 13 cm/s o meio filtrante coletou $0,23 \text{ g/cm}^2$.

É possível observar na Figura 4.29, para o meio filtrante Rad Plus com VI de 18 cm/s, alguns ciclos de filtração de longa duração, esse comportamento foi devido a problemas no sugador de pó ocorridos durante alguns ciclos de filtração. Isso fez com que o meio filtrante Rad Plus obtivesse maior massa coletada acumulada.

A Figura 4.30 e 4.31 apresenta a curva de massa removida e massa retida em função do número de ciclos para o meio filtrante Rad Plus.

Para o meio filtrante Rad Plus com VI de 18 cm/s, os valores de massa removida até o 47º ciclo de filtração apresentaram valores inconstantes, devido sua variação nos tempos de filtração. Os ciclos com maior tempo de filtração acumularam maior quantidade de partículas levando a um maior valor de massa removida durante a remoção da torta.

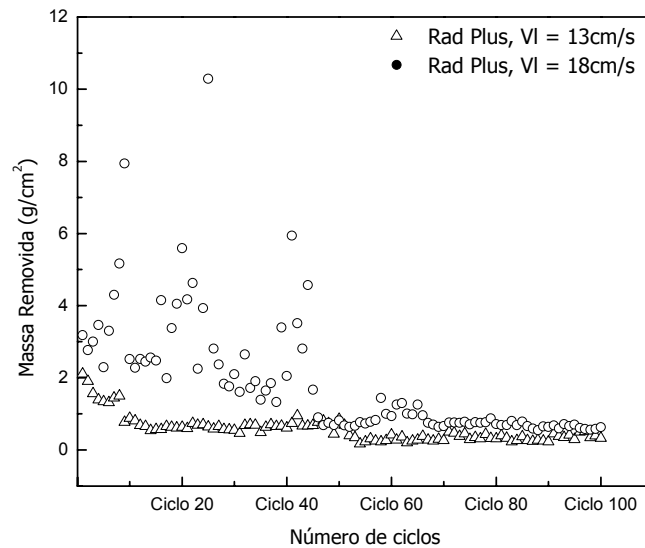


Figura 4.30: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

A partir do 47º ciclo o meio filtrante com VI de 18 cm/s teve um comportamento semelhante à curva com VI de 13 cm/s, ambos apresentando valores próximos e com tendência a estabilizar a partir do ciclo 70.

Para o meio filtrante Rad Plus com VI de 13 cm/s, nota-se pouca variação nos valores de massa removida a partir do 10º ciclo. Este comportamento indica que foi necessário um tempo de filtração menor para que o meio filtrante atingisse a perda de carga mássica durante o processo de filtração. Menor tempo de filtração formou uma torta de filtração menos espessa, resultando em um menor valor de massa removida durante a limpeza.

A Figura 4.31 mostra que o meio filtrante Rad Plus com VI de 13 cm/s apresentou maiores valores de massa retida acumulada durante os ciclos de filtração. O meio filtrante Rad Plus para VI de 18 cm/s formou uma torta menos espessa de 2,02 g/cm² sendo que para a VI de 13 cm/s a torta formada foi de 2,60 g/cm². Este resultado foi contrário quando comparado para o meio filtrante Rad Mais, sendo que o meio filtrante que formou a torta mais espessa não foi necessariamente o que acumulou maior quantidade de massa. Isto mostra que a VI de 18 cm/s

foi mais eficiente na remoção da torta, restando uma menor quantidade de partículas no meio filtrante.

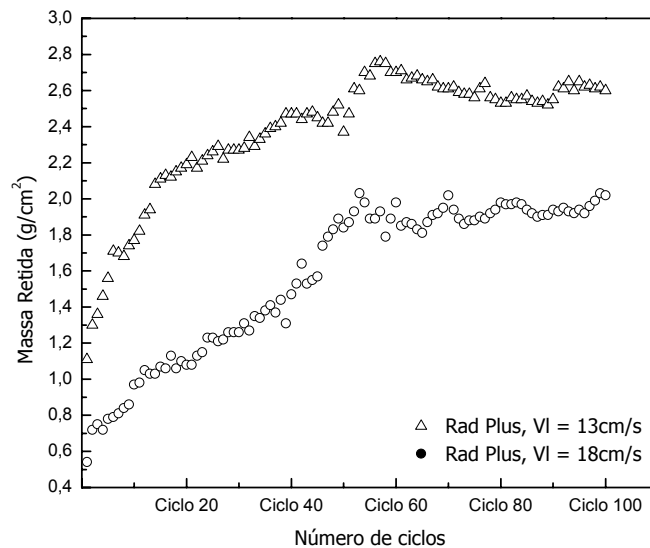


Figura 4.31: Massa retida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para o teste com o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s, a VI de 18 cm/s foi a que apresentou a formação de torta menos espessa.

Observa-se ainda na Figura 4.31 que o meio filtrante Rad Plus com VI de 13 cm/s apresentou um comportamento de curva quase constante dos valores de massa retida a partir do ciclo 90. Este comportamento indica a saturação do meio filtrante, ou seja, a massa coletada na filtração era praticamente removida durante a limpeza.

Pode-se observar o comportamento da perda de carga residual em função do número de ciclos através da Figura 4.32.

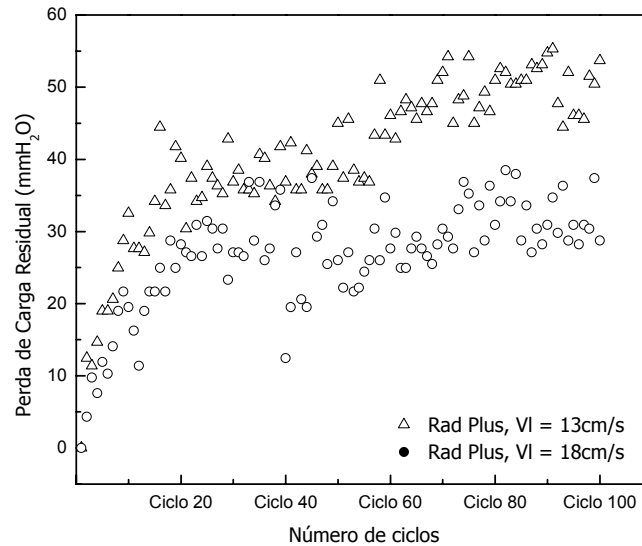


Figura 4.32: Perda de carga residual versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.

O aumento da perda de carga residual está relacionado com o aumento da quantidade de massa retida no meio filtrante. O meio filtrante Rad Plus com Vl de 13 cm/s apresentou maior quantidade de massa retida, apresentou também maior valor de perda de carga residual, conforme era esperado. Para as velocidades de limpeza testada, o meio filtrante não apresentou tendência a estabilizar os valores de perda de carga residual.

O comportamento da perda de carga residual está também relacionado com o comportamento da porosidade e da resistência específica da torta conforme apresentadas nas Figuras 4.33 e 4.34. Na Figura 4.33, observa-se que a porosidade da torta diminui com o aumento do número de ciclos, porque a espessura da torta no meio filtrante tende a aumentar, tornando a torta menos porosa, o que dificulta o escoamento do fluxo de gás através do meio filtrante aumentando sua perda de carga residual.

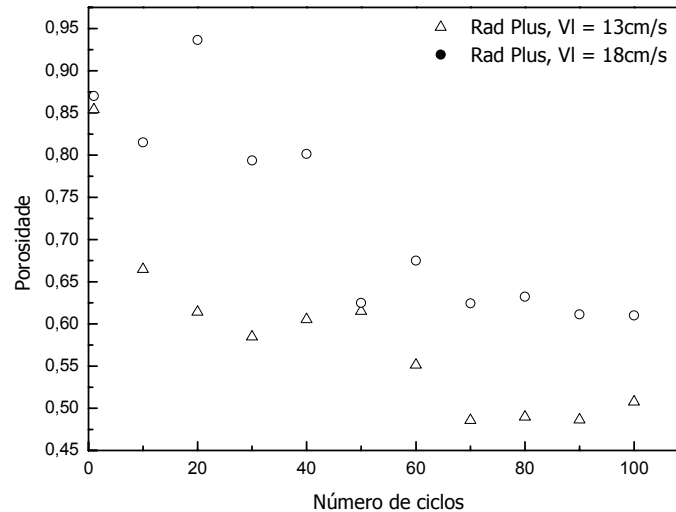


Figura 4.33: Porosidade versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para este meio filtrante, os valores de porosidade para o primeiro ciclo de filtração foram próximos quando comparados com o meio filtrante Rad Mais. Este comportamento semelhante deve-se a mesma espessura da torta formada, de $0,014 \text{ g/cm}^2$, para o primeiro ciclo.

ITO (2004), utilizando feltro de poliéster com gramatura 534 g/m^2 , como material particulado o concentrado fosfático com diâmetro volumétrico de $14,53 \mu\text{m}$ e trabalhando com Vf de 5 cm/s e $\Delta P_{\text{máxima}}$ de $496,5 \text{ mmH}_2\text{O}$, encontrou porosidade de 0,45 para o primeiro ciclo de filtração. Neste experimento o valor de porosidade para o primeiro ciclo de filtração foi maior quando comparado com o resultado de ITO (2004). Por ser o meio filtrante de poliéster mais espesso que o meio filtrante de celulose, este comportamento pode ter ocorrido devido à formação de uma torta mais espessa no trabalho de ITO (2004).

A porosidade da torta tem um comportamento inverso com relação à resistência específica da torta. Este comportamento pode ser observado na Figura 4.34 que representa a variação da resistência específica da torta em função do número de ciclos.

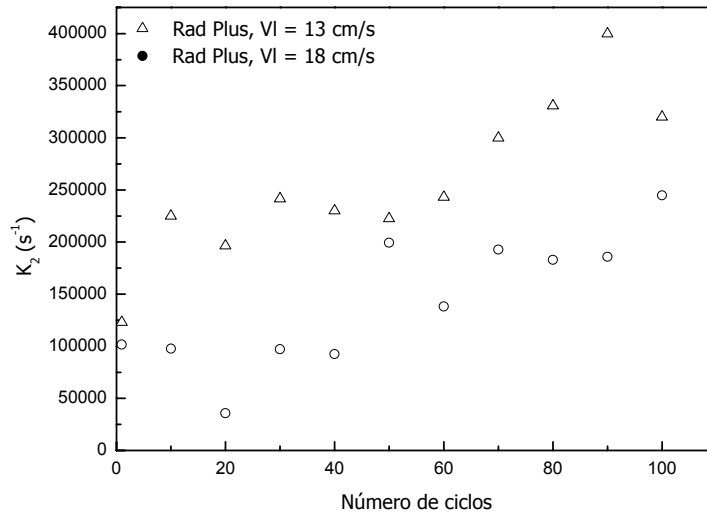


Figura 4.34: Resistência específica da torta versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Como dito anteriormente, à medida que aumenta o número de ciclos a porosidade da torta tende a diminuir. Com a diminuição da porosidade da torta, torna-se mais difícil a passagem do fluido através da camada de pó evidenciando o aumento da resistência específica da torta, como observado na Figura 4.34.

A Figura 4.35 mostra a eficiência de remoção em função do número de ciclos.

Nota-se que o meio filtrante com VI de 18 cm/s obteve maior eficiência de remoção. Nos ciclos iniciais este meio filtrante obteve valor mais alto de eficiência em relação ao meio filtrante com VI de 13 cm/s.

Para a VI de 13 cm/s observa-se que a partir do ciclo 50, o meio filtrante obteve baixos valores, de aproximadamente 15% de eficiência de remoção.

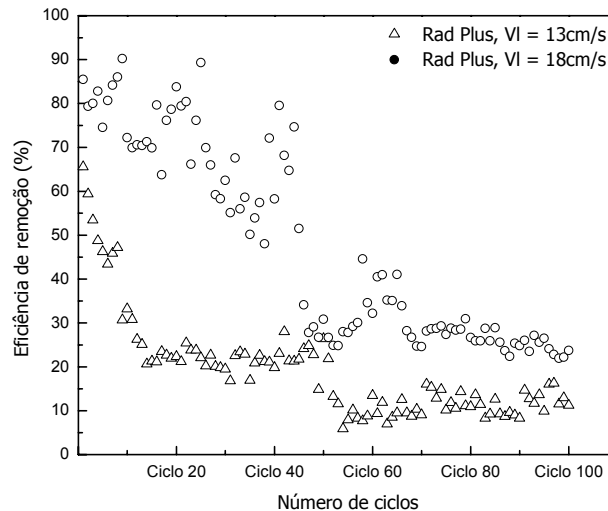


Figura 4.35: Eficiência de remoção versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para o experimento com o meio filtrante Rad Plus para Vf de 10 cm/s, as curvas de eficiência de remoção apresentaram comportamento semelhante para as duas velocidades de limpeza.

4.4.3 – Comparação do comportamento do meio filtrante Rad Plus e Rad Mais com Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s

Para uma melhor comparação dos meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus para VI de 13 cm/s e VI de 18 cm/s, foram construídas as curvas de massa removida, massa retida acumulada, perda de carga residual em função do número de ciclos, apresentadas nas Figuras 4.36 a 4.39.

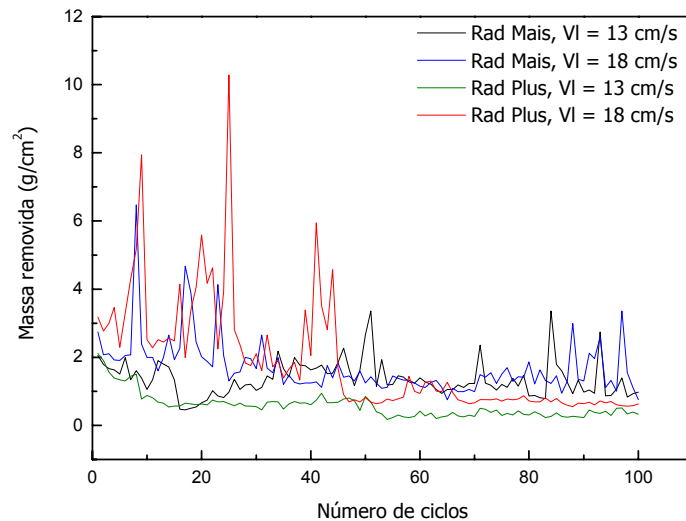


Figura 4.36: Massa removida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Nota-se na Figura 4.36 que ao se trabalhar com os meios filtrantes com Vf de 5 cm/s e VI de 18 cm/s, o meio filtrante Rad Plus removeu maior quantidade de partículas até aproximadamente o ciclo 45. Esta maior remoção deve-se ao fato de um maior acúmulo de massa devido aos ciclos de filtração mais longos e a maior eficiência desta VI para remover a torta formada. Após o ciclo 45 o meio filtrante Rad Plus passou a remover menor quantidade de massa de torta tornando-se constante estes valores. O meio filtrante Rad Mais, para a VI de 18 cm/s, não apresentou tendência a estabilizar e apresentou maior remoção de torta a partir do ciclo 45 quando comparado com o meio filtrante Rad Plus. Ao observar as Figuras 4.22 e 4.29, percebe-se que o meio filtrante Rad Mais teve um acúmulo de massa menor que o meio filtrante Rad Plus, porém, sua maior remoção de massa após o ciclo 45 se deve ao fato do meio filtrante Rad Mais ser mais permeável, permitindo que a VI de 18 cm/s fosse mais eficaz para remover maior quantidade de partículas do interior do meio filtrante.

Para a VI de 13 cm/s percebe-se que o meio filtrante Rad Mais teve uma maior remoção durante todo o processo de filtração e remoção de torta. Nas Figuras 4.22 e 4.29

observa-se que o meio filtrante Rad Mais teve um maior acúmulo de massa, mais que o dobro, quando comparado com o meio filtrante Rad Plus. Este fator pode justificar a maior remoção de torta por parte do meio filtrante Rad Mais. O meio filtrante Rad Plus apresentou pouca variação nos valores de massa removida ciclo a ciclo. Sendo este menos permeável e com formação de torta mais superficial, como discutido anteriormente, pode-se dizer que este apresentou uma saturação do tecido logo nos ciclos iniciais, sendo que as partículas filtradas não se aderiram no tecido, sendo removidas durante a limpeza.

A Figura 4.37 apresenta a comparação dos valores de massa retida em função do número de ciclos para os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus.

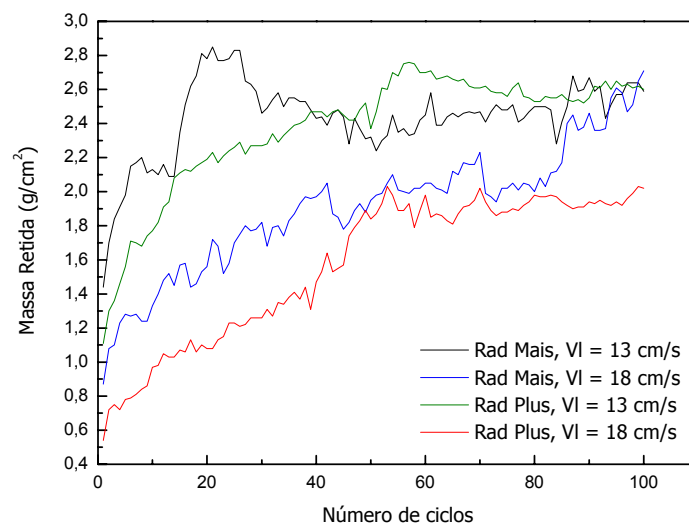


Figura 4.37: Massa retida versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e Vl de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para a Vl de 18 cm/s o meio filtrante Rad Mais foi o que reteve maior quantidade de partículas durante os 100 ciclos de filtração. Este fato se deve ao maior período de filtração interna e maior permeabilidade apresentado para este meio filtrante, fazendo com que as partículas penetrem mais profundamente no tecido o que dificulta sua remoção durante a limpeza. O meio filtrante Rad Plus teve uma capacidade de retenção menor que o meio filtrante

Rad Mais o que pode ser justificado pela sua característica de formação de torta superficial. Verifica-se na Figura 4.37 que os valores de massa retida para o meio filtrante Rad Plus permanecem quase constantes nos ciclos finais indicando a ocorrência de saturação do meio filtrante não sendo este comportamento observado para o meio filtrante Rad Mais.

Trabalhando com a VI de 13 cm/s observa-se que o meio filtrante Rad Mais apresentou uma maior capacidade de retenção das partículas nos ciclos iniciais, seguindo de uma queda nesse comportamento, finalizando os ciclos de filtração com um comportamento de curva semelhante ao meio filtrante Rad Plus. Apesar do meio filtrante Rad Mais possuir um maior período de filtração interna, dificultando a remoção das partículas no interior do meio filtrante, observa-se que aproximadamente dos ciclos 40 a 85, o meio filtrante Rad Plus reteve maior quantidade de partículas mostrando, portanto, que a VI de 13 cm/s foi mais eficiente para remover as partículas do meio filtrante Rad Mais.

O comportamento das curvas de massa retida para a Vf de 5 cm/s foi o mesmo apresentado na Figura 4.19, para a Vf de 10 cm/s.

A Figura 4.38 mostra o comportamento da perda de carga residual para os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus em função do número de ciclos.

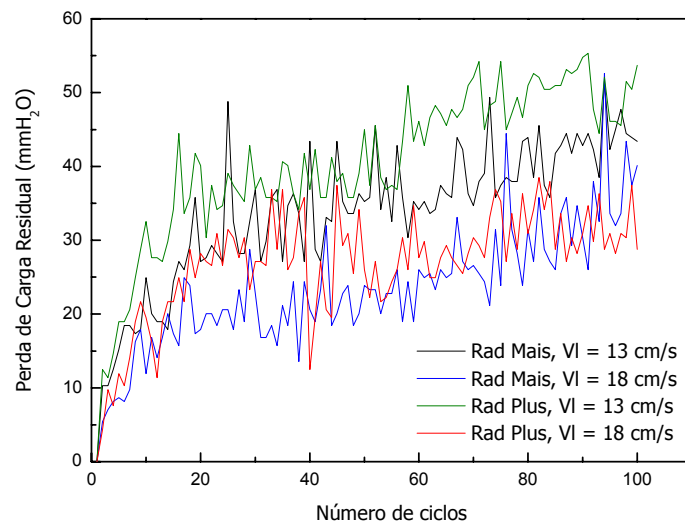


Figura 4.38: Perda de Carga residual versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Observa-se nesta Figura que os valores de perda de carga residual, para todos os meios filtrantes, não apresentaram tendência a permanecer constante.

Apesar do meio filtrante Rad Mais para a VI de 18 cm/s ter retido maior quantidade de partícula em relação ao meio filtrante Rad Plus, estes apresentaram valores próximos de perda de carga residual. Já para a VI de 13 cm/s o meio filtrante Rad Plus obteve valores mais altos quando comparado com o meio filtrante Rad Mais. Este comportamento para o meio filtrante Rad Plus, reduz a duração dos ciclos de filtração, fazendo com o meio filtrante alcance mais rapidamente a perda de carga máxima.

O meio filtrante Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 18 cm/s apresentou formação de torta mais espessa e menor perda de carga residual. Esse comportamento foi semelhante para o meio filtrante Rad Mais para Vf de 10 cm/s e VI de 18 cm/s.

Verifica-se que em todas as condições experimentais testadas, a perda de carga residual aumentou com o aumento do número de ciclos. Este comportamento era esperado, uma vez que após cada limpeza as partículas remanescentes no meio filtrante tendem a aumentar, contribuindo para o aumento da perda de carga residual.

A curva de eficiência de remoção em função do número de ciclos está apresentada na Figura 4.39.

Nota-se na Figura 4.39 que o meio filtrante Rad Plus para VI de 18 cm/s, com maior massa coletada acumulada e maior massa removida foi o que alcançou maior valor de eficiência de remoção e os meios filtrantes com menor massa coletada acumulada e menores valores de massa removida obtiveram valores menores de eficiência.

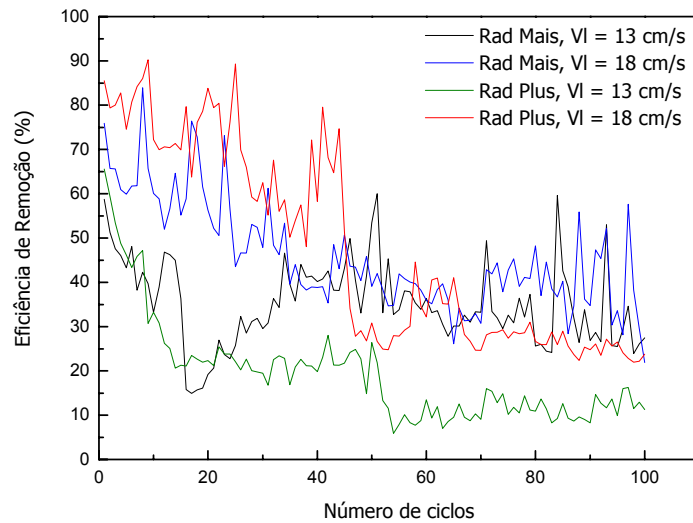


Figura 4.39: Eficiência de remoção versus número de ciclos para os meio filtrante Rad Plus e Rad Mais para Vf de 5 cm/s e VI de 13 cm/s e 18 cm/s.

Para essas condições experimentais poder-se escolher como melhor meio filtrante o Rad Mais com VI de 18 cm/s, sendo este meio filtrante o que acumulou mais massa, reteve maior massa e obteve menor perda de carga residual durante os 100 ciclos de filtração e limpeza.

5- CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos durante a realização desse estudo pode-se concluir que:

- Os meios filtrantes Rad Mais e Rad Plus apresentaram maior espessura de torta e maior massa retida nos 100 ciclos de filtração com V_f de 5 cm/s em relação a filtração com V_f de 10 cm/s.
- O meio filtrante Rad Mais para a V_l de 18 cm/s obteve maior espessura de torta e maior massa retida nas duas velocidades de filtração aqui investigadas.
- O meio filtrante Rad Mais para V_f de 10 cm/s e V_l de 18 cm/s obteve maior massa retida, no entanto apresentou menor perda de carga residual devido sua menor porosidade.
- O meio filtrante Rad Plus com V_l de 13 cm/s apresentou menor eficiência na remoção da torta, no que resultou em uma maior massa retida no meio filtrante e maior perda de carga residual, para as duas velocidades de filtração utilizadas nesse estudo.
- Para velocidade de filtração de 10 cm/s o meio filtrante Rad Plus, menos permeável, formou torta mais superficial, sendo a velocidade de limpeza de 13 cm/s suficiente para remover maior massa de pó, quando comparado com o meio filtrante Rad Mais. Entretanto, na velocidade de filtração de 5 cm/s a situação se inverteu e o meio filtrante Rad Mais, mais poroso e mais permeável, removeu maior massa de pó, nas mesmas condições experimentais.
- O comportamento das curvas de massa retida e perda de carga residual foram semelhantes para as duas velocidades de filtração investigadas nesse estudo.

- O meio filtrante Rad Mais, quando submetido à velocidade de filtração de 10 cm/s e velocidade de limpeza de 18 cm/s, obteve a melhor condição operacional, porque apresentou menor perda de carga residual para uma maior massa retida durante os 100 ciclos de filtração.
- Somente os valores de perda de carga residual não foram necessários para concluir qual melhor meio filtrante.

6- SUGESTÕES DE TRABALHOS

Para aprofundar o conhecimento da aplicação dos meios filtrantes de fibras de celulose, apresenta-se algumas sugestões:

- utilizar outros meios filtrantes de fibras de celulose.
- variar o material particulado utilizado.
- variar a umidade.
- estudar outras técnicas de limpeza como o pulso de ar reverso.
- estudar o comportamento “patcy cleanning” da remoção das tortas.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M.L. Filtração de ar em filtros de tecido. 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- AGUIAR, M.L. *Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 1995.
- CALLÉ, S., CONTAL, P. THOMAS, D., BÉMER, D. LECLERC, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. Powder Technology, v. 128, p. 213-217, 2002a.
- CAVASSENO, V. *Industrial Air Pollution Engineering*. McGraw-Hill, U. S. A. 1980.
- CHENG, Y.-H E TSAI, C. –*Journal of Aerosol Science and Technology*, v.29, n.4, p.315-328, 1998.
- COURY, J. R., Tese de Doutorado, Cambridge Univ., Inglaterra, 1983
- DICKENSON, C. *Filters and Filtration Handbook*. 3rd ed. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1994.
- DONOVAN, R.P. Fabric filtration for combustion sources. New York, Marcel Dekker Inc., 1985.
- DULLLIEN, F.A.L. Introduction to industrial gas cleaning. Academic Press, San Diego, 1989, 284p.
- Guia para Condicionamento de Gás Natural em Estações de Regulagem de Pressão e Medição de Volume – Gás Technical Systems - GTS
- HOFLINGER, W.; STOCKLMAYER, Ch.; HACHAL, A. “Model calculation of the compression behavior of dust filters cakes”. *Filtration and Separation*, p. 807 – 811, dec., 1994
- INNOCENTINI, M. D. M. PANDOLFELLI. V. C. Considerações sobre a estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer, v.45, 1999.

- INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A. R. F.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V.C.
How accurate is Darcy's law. *The American Ceramic Society Bulletin*, p.64-68 nov, 1999.
- ITO, L. X. Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- JAPUNTICH, D.A.; STENHOUSE, J.I.T.; LIU, Y.H. Effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous filter . *Journal of Aerosol Science*, v.28, n.01, p.147-158, 1996.
- KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. *Powder Technology*, n. 86, p.21-29, 1996.
- LEITH, D.; ALLEN, R.W.K. Dust Filtration by Fabric Filters. *Progress in Filtration and Separation*, v. 4, p.1-55, 1986.
- MARTINS, J.C. Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás sólido. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP
- MATTESON, M.J.; ORR, C. *Filtration: Principles and Practices*. 2 Edition. New York, USA: Marcel Dekker Inc., 1986. v. 27 (Chemical Industries).
- MAUSCHITZ.G.; KOSCHUTNIG,W.; HÖFLINGER,W. The influence of filter regeneration on the internal particle rearrangement of nonwovens for cleanable dust filters. 16 th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2004.
- NEGRINI, V.S.; MARTINS, J.C.; COURY, J.R. E AGUIAR, M.L. Determinação da porosidade de tortas de filtração de gases em função da velocidade superficial de filtração. In: XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, São João Del-Rei, MG, 2000, Anais do XXVIII ENEMP, Teresópolis, RJ, 2001, p. 191-197.
- RODRIGUES, A. C. M. Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecido de polipropileno e de algodão. 2004. Dissertação (Mestrado em

- Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- RODRIGUES, K. B. Filtração gás-sólido em diferentes meios filtrantes: influência do tratamento do filtro no ciclo de filtração. XXXI Enemp, Anais em CD-Room, 2004
- SCHMIDT, E. & LOFFLER, F., “The analysis of dust cake structures”, Part. Syst. Charact., v. 8, p. 105 – 109, 1991
- SILVA, C.R.N. et al. Influence of gas velocity on cake formation and detachment. Powder Technology, v. 101, p.165-172, 1998.
- SILVA NETO, O. G., “Estudo da Porosidade de Tortas em Filtros de Manga operando na Filtração de gases”, São Carlos, UFSCar, 2002 (Tese)
- SONG, C. B et al. Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles. Powder Technology, p.1-8, 2006.
- STÖCKLMAYER, CH., HÖFLINGER W. Simulation of the regeneration of dust filters. Mathematics and Computer in Simulations. V.46, p.601-609, 1998.
- TIENE, E. F. Filtração de gases; Estudo do fenômeno da limpeza por blocos. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP
- TSAI, C.J., CHENG, Y.H. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. Aerosol Science and Technology, v.29, p.315-328, 1998
- VDI 3926 Part 1. “Testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media”. Düsseldorf, Germany, (2003).

**APÊNDICE A – Dados dos ensaios de filtração de gases para os meios filtrantes Rad
Mais e Rad Plus com Vf = 10 cm/s e VI = 13 cm/s e 18 cm/s**

Tabela A. 1 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com Vf = 10 cm/s e VI = 13
cm/s

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm ²)	Massa Retida (g/cm ²)	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)	Eficiência de Remoção (%)
1	2,07	1,44	0	58,97
2	1,87	1,56	19,518	54,52
3	2,05	1,53	21,687	57,26
4	2	1,56	35,241	56,18
5	1,88	1,54	29,819	54,97
6	1,68	1,54	37,41	52,17
7	1,71	1,55	37,41	52,45
8	1,62	1,53	42,831	51,43
9	1,57	1,58	44,458	49,84
10	1,54	1,6	45,542	49,04
11	1,54	1,65	47,169	48,28
12	1,69	1,63	57,47	50,90
13	1,64	1,55	87,831	51,41
14	1,77	1,53	55,843	53,64
15	1,59	1,59	60,181	50,00
16	1,67	1,55	82,41	51,86
17	1,41	1,61	56,928	46,69
18	1,46	1,62	55,301	47,40
19	1,58	1,55	57,47	50,48
20	1,44	1,55	60,723	48,16
21	1,35	1,57	64,518	46,23
22	1,62	1,56	60,181	50,94
23	1,25	1,65	63,976	43,1
24	1,26	1,67	71,566	43
25	1,23	1,77	69,398	41

26	1,24	1,65	69,94	42,91
27	1,39	1,72	73,193	44,69
28	1,85	1,68	46,084	52,41
29	0,86	1,77	86,747	32,7
30	0,79	1,82	78,072	30,27
31	0,83	1,88	78,614	30,63
32	0,84	1,87	80,783	31
33	0,8	1,89	79,699	29,74
34	0,85	1,87	79,157	31,25
35	0,84	1,87	81,867	31
36	0,8	1,9	79,699	29,63
37	0,85	1,87	92,169	31,25
38	0,92	1,92	81,325	32,39
39	0,82	1,89	93,253	30,26
40	0,69	2,04	83,494	25,27
41	0,84	1,98	97,048	29,79
42	0,83	2,04	82,952	28,92
43	0,81	2,04	83,494	28,42
44	0,84	2,08	83,494	28,77
45	0,85	2,11	94,337	28,72
46	0,75	2,1	83,494	26,32
47	0,78	2,12	87,831	26,9
48	0,87	2,09	90	29,39
49	0,82	2,09	91,627	28,18
50	0,77	2,11	88,373	26,74
51	0,73	2,14	90,542	25,44
52	0,78	2,14	92,711	26,71
53	0,64	2,12	99,217	23,19
54	0,62	2,13	96,506	22,55
55	0,74	2,14	97,59	25,69
56	0,68	2,17	97,59	23,86

57	0,46	2,34	81,867	16,43
58	0,44	2,41	94,88	15,44
59	0,48	2,36	100,301	16,9
60	0,55	2,36	98,675	18,9
61	0,81	2,34	99,217	25,71
62	1,04	2,32	92,169	30,95
63	0,78	2,32	98,675	25,16
64	0,86	2,32	100,843	27,04
65	0,73	2,32	102,47	23,93
66	0,7	2,35	104,639	22,95
67	0,67	2,37	106,265	22,04
68	0,97	2,29	103,554	29,75
69	0,68	2,31	104,096	22,74
70	0,69	2,32	106,265	22,92
71	0,78	2,27	111,687	25,57
72	0,65	2,28	107,349	22,18
73	0,67	2,23	116,566	23,1
74	0,63	2,19	107,349	22,34
75	0,79	2,14	103,554	26,96
76	0,79	2,08	112,229	27,53
77	0,82	2,09	108,976	28,18
78	0,82	2,09	112,771	28,18
79	0,72	2,12	114,398	25,35
80	0,72	2,12	113,855	25,35
81	0,69	2,12	108,976	24,56
82	0,96	2,13	121,988	31,07
83	0,78	2,08	115,482	27,27
84	0,71	2,08	114,94	25,45
85	0,73	2,08	113,313	25,98
86	0,74	2,15	124,157	25,61
87	1	2,25	103,554	30,77

88	0,71	2,22	108,976	24,23
89	0,6	2,34	103,554	20,41
90	0,57	2,33	116,566	19,66
91	0,8	2,28	169,157	25,97
92	0,75	2,27	107,892	24,83
93	0,78	2,32	106,265	25,16
94	0,97	2,28	107,892	29,85
95	1,04	2,29	116,024	31,23
96	0,83	2,31	107,892	26,43
97	0,79	2,31	116,024	25,48
98	0,81	2,29	112,771	26,13
99	0,8	2,26	117,651	26,14
100	0,84	2,28	112,771	26,92

Tabela A. 2 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 10$ cm/s e $V_l = 13$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s ⁻¹)
1	0,938099216	125613
10	0,798400409	133609
20	0,78268508	154124
30	0,691410717	195142
40	0,689621725	174891
50	0,683534871	194341
60	0,618263061	233718
70	0,663553614	177174
80	0,666449677	211423
90	0,625628948	214564
100	0,695590378	144436

Tabela A. 3 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 10$ cm/s e $V_l = 18$ cm/s

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm ²)	Massa Retida (g/cm ²)	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)	Eficiência de Remoção (%)
1	1,87	1	0,000	65,16
2	1,43	1,07	17,892	57,20
3	1,23	1,13	21,145	52,12
4	1,2	1,19	21,145	50,21
5	1,32	1,09	28,193	54,77
6	1,18	1,11	26,024	51,53
7	1,06	1,18	27,108	47,32
8	1,17	1,25	31,988	48,35
9	1,2	1,26	35,783	48,78
10	1,52	1,23	31,988	55,27
11	1,09	1,25	35,241	46,58
12	0,95	1,32	37,952	41,85
13	0,85	1,36	40,663	38,46
14	0,9	1,39	37,952	39,30
15	0,8	1,4	41,205	36,36
16	0,86	1,35	40,663	38,91
17	0,84	1,34	38,494	38,53
18	0,8	1,35	46,627	37,21
19	0,77	1,38	41,205	35,81
20	0,76	1,42	45,542	34,86
21	0,91	1,45	45,000	38,56
22	0,91	1,45	43,916	38,56
23	0,88	1,45	43,916	37,77
24	0,91	1,45	41,747	38,56
25	1,02	1,46	64,518	41,13
26	0,98	1,41	45,000	41,00

27	0,92	1,41	56,386	39,48
28	0,9	1,4	48,795	39,13
29	0,81	1,42	47,711	36,32
30	0,8	1,43	47,711	35,87
31	0,83	1,45	46,627	36,40
32	0,82	1,47	55,843	35,81
33	0,87	1,5	48,795	36,71
34	1,01	1,51	46,084	40,08
35	0,87	1,46	61,807	37,34
36	0,74	1,46	53,133	33,64
37	0,66	1,5	53,675	30,56
38	0,62	1,53	62,349	28,84
39	0,74	1,51	56,386	32,89
40	0,55	1,55	56,386	26,19
41	0,6	1,58	56,386	27,52
42	0,85	1,48	61,265	36,48
43	0,72	1,52	53,675	32,14
44	0,65	1,52	54,217	29,95
45	0,74	1,54	54,759	32,46
46	0,72	1,51	58,012	32,29
47	0,64	1,56	54,217	29,09
48	0,59	1,61	61,265	26,82
49	0,67	1,61	56,928	29,39
50	0,6	1,55	65,060	27,91
51	0,58	1,55	60,181	27,23
52	0,59	1,58	61,807	27,19
53	0,65	1,64	67,229	28,38
54	0,48	1,66	58,554	22,43
55	0,62	1,68	59,096	26,96
56	0,9	1,61	66,687	35,86
57	0,69	1,61	56,928	30,00

58	0,71	1,6	62,349	30,74
59	0,62	1,62	61,807	27,68
60	0,62	1,65	64,518	27,31
61	0,83	1,72	72,651	32,55
62	0,5	1,72	71,024	22,52
63	0,84	1,63	63,976	34,01
64	0,75	1,63	63,434	31,51
65	0,58	1,63	68,313	26,24
66	0,62	1,63	67,229	27,56
67	0,58	1,61	66,687	26,48
68	0,46	1,65	66,687	21,80
69	0,46	1,66	68,313	21,70
70	0,52	1,63	73,193	24,19
71	0,4	1,64	73,193	19,61
72	0,67	1,65	64,518	28,88
73	0,6	1,62	74,819	27,03
74	0,51	1,6	64,518	24,17
75	0,55	1,65	65,060	25,00
76	0,47	1,67	66,687	21,96
77	0,53	1,65	67,229	24,31
78	0,47	1,67	67,229	21,96
79	0,43	1,69	68,313	20,28
80	0,44	1,69	69,940	20,66
81	0,49	1,62	74,277	23,22
82	0,5	1,62	70,482	23,58
83	0,4	1,68	72,108	19,23
84	0,47	1,66	74,819	22,07
85	0,38	1,7	74,277	18,27
86	0,43	1,72	73,193	20,00
87	0,47	1,69	73,735	21,76
88	0,6	1,77	75,361	25,32

89	0,57	1,7	71,024	25,11
90	0,43	1,75	67,229	19,72
91	0,36	1,77	71,566	16,90
92	0,44	1,8	71,566	19,64
93	0,31	1,84	59,096	14,42
94	0,47	1,79	75,904	20,80
95	0,44	1,82	73,193	19,47
96	0,4	1,81	75,361	18,10
97	0,45	1,71	80,241	20,83
98	0,38	1,77	67,229	17,67
99	0,44	1,8	89,458	19,64
100	0,48	1,73	73,193	21,72

Tabela A. 4 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 10$ cm/s e $V_l = 18$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s ⁻¹)
1	0,906838785	150250
10	0,789207557	167413
20	0,676803516	234672
30	0,678146162	232301
40	0,631479214	304449
50	0,6242819	285226
60	0,641701001	260956
70	0,606410648	303561
80	0,591168345	321253
90	0,603863063	297905
100	0,571894564	351242

Tabela A. 5 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 10 \text{ cm/s}$ e $V_l = 13 \text{ cm/s}$

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm^2)	Massa Retida (g/cm^2)	Perda de Carga Residual (mmH_2O)	Eficiência de Remoção (%)
1	1,08	1,61	0,000	40,15
2	0,85	1,8	25,482	32,08
3	0,9	1,95	26,566	31,58
4	0,96	2	31,988	32,43
5	0,77	1,92	35,241	28,62
6	1,04	1,76	39,578	37,14
7	0,8	1,83	31,988	30,42
8	0,83	1,84	41,205	31,09
9	1,13	1,87	42,289	37,67
10	1,24	1,73	39,578	41,75
11	1,05	1,64	41,205	39,03
12	1,04	1,62	47,169	39,10
13	1,04	1,64	47,169	38,81
14	0,94	1,7	50,964	35,61
15	0,91	1,67	59,639	35,27
16	0,75	1,7	51,506	30,61
17	0,9	1,69	61,265	34,75
18	0,83	1,64	49,880	33,60
19	0,81	1,69	49,880	32,40
20	0,73	1,74	52,048	29,55
21	0,7	1,77	55,843	28,34
22	0,71	1,76	60,723	28,74
23	0,66	1,76	60,181	27,27
24	0,63	1,73	63,976	26,69
25	0,73	1,77	69,398	29,20
26	0,72	1,78	68,855	28,80

27	0,62	1,74	68,313	26,27
28	0,56	1,76	68,855	24,14
29	0,6	1,69	76,988	26,20
30	0,57	1,73	76,446	24,78
31	0,51	1,76	76,988	22,47
32	0,48	1,74	75,904	21,62
33	0,53	1,76	76,988	23,14
34	0,63	1,78	81,867	26,14
35	0,7	1,77	74,819	28,34
36	0,74	1,81	68,855	29,02
37	0,65	1,78	75,904	26,75
38	0,61	1,85	76,988	24,80
39	0,73	1,81	81,867	28,74
40	0,61	1,83	78,614	25,00
41	0,54	1,81	80,783	22,98
42	0,53	1,86	84,578	22,18
43	0,51	1,88	95,964	21,34
44	0,56	1,91	99,217	22,67
45	0,53	1,85	95,422	22,27
46	0,54	1,83	88,373	22,78
47	0,46	1,89	87,831	19,57
48	0,5	1,86	94,337	21,19
49	0,52	1,88	92,711	21,67
50	0,52	1,87	100,301	21,76
51	0,68	1,94	114,940	25,95
52	0,5	1,93	91,084	20,58
53	0,56	1,9	94,337	22,76
54	0,54	1,91	84,036	22,04
55	0,53	1,89	86,747	21,90
56	0,49	1,93	86,747	20,25
57	0,57	1,92	87,289	22,89

58	0,53	1,9	92,711	21,81
59	0,49	1,91	93,253	20,42
60	0,38	1,93	95,422	16,45
61	0,49	1,94	108,434	20,16
62	0,47	1,93	95,422	19,58
63	0,39	1,95	95,422	16,67
64	0,34	1,95	106,807	14,85
65	0,4	1,92	108,976	17,24
66	0,26	1,87	91,627	12,21
67	0,33	1,92	103,012	14,67
68	0,32	1,92	111,687	14,29
69	0,35	1,91	104,096	15,49
70	0,27	1,95	106,807	12,16
71	0,35	1,91	117,108	15,49
72	0,45	1,9	108,434	19,15
73	0,46	1,88	110,602	19,66
74	0,39	1,93	103,554	16,81
75	0,37	1,93	104,096	16,09
76	0,35	1,94	107,892	15,28
77	0,34	1,91	105,723	15,11
78	0,38	1,93	107,892	16,45
79	0,36	1,92	108,434	15,79
80	0,37	1,93	108,434	16,09
81	0,38	1,92	117,108	16,52
82	0,36	1,94	109,518	15,65
83	0,36	1,96	108,976	15,52
84	0,29	1,98	111,687	12,78
85	0,51	1,97	113,855	20,56
86	0,4	1,98	101,386	16,81
87	0,57	1,84	84,578	23,65
88	0,4	1,91	104,639	17,32

89	0,34	1,96	101,928	14,78
90	0,31	1,97	101,386	13,60
91	0,36	1,99	110,060	15,32
92	0,36	1,96	108,976	15,52
93	0,36	1,98	112,229	15,38
94	0,47	2,04	110,060	18,73
95	0,43	2,05	117,108	17,34
96	0,38	2,03	107,349	15,77
97	0,41	2,06	107,349	16,60
98	0,46	2,05	103,554	18,33
99	0,43	2,04	103,012	17,41
100	0,44	2,08	104,639	17,46

Tabela A. 6 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Maiscom $V_f = 10$ cm/s e $V_l = 13$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s ⁻¹)
1	0,885531105	194090
10	0,730821271	220055
20	0,676803343	268434
30	0,636433572	280381
40	0,644328879	280977
50	0,612147064	302459
60	0,569107123	373457
70	0,529614992	458310
80	0,561601499	357861
90	0,535510468	493038
100	0,59892076	269333

Tabela A. 7 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 10 \text{ cm/s}$ e $V_l = 18 \text{ cm/s}$

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm^2)	Massa Retida (g/cm^2)	Perda de Carga Residual (mmH_2O)	Eficiência de Remoção (%)
1	2,86	1,18	0	70,79
2	2,48	1,38	10,843	64,25
3	2,53	1,47	13,012	63,25
4	2,53	1,44	18,976	63,73
5	2,74	1,52	16,807	64,32
6	1,9	1,79	20,06	51,49
7	1,8	1,79	25,482	50,14
8	1,54	1,77	23,855	46,53
9	1,42	1,77	25,482	44,51
10	1,5	1,75	24,398	46,15
11	1,73	1,71	23,313	50,29
12	1,55	1,76	32,53	46,83
13	1,51	1,74	27,651	46,46
14	1,67	1,7	27,651	49,55
15	1,53	1,7	31,988	47,37
16	2,1	1,71	40,12	55,12
17	1,58	1,8	33,614	46,75
18	1,68	1,81	37,952	48,14
19	1,76	1,88	36,325	48,35
20	1,49	1,92	40,12	43,70
21	1,66	1,77	40,663	48,40
22	1,67	1,75	37,952	48,83
23	1,82	1,87	39,036	49,32
24	1,55	1,91	40,663	44,80
25	1,65	1,98	41,747	45,45
26	1,8	1,97	39,578	47,75

27	1,63	1,99	39,578	45,03
28	1,53	2,03	37,41	42,98
29	1,4	2,05	41,205	40,58
30	1,48	2,05	47,711	41,93
31	1,28	2,09	54,759	37,98
32	1,38	2,07	39,036	40,00
33	1,45	2,11	38,494	40,73
34	1,33	2,11	42,289	38,66
35	1,3	2,12	39,578	38,01
36	1,22	2,13	40,12	36,42
37	1,21	2,18	43,373	35,69
38	1,07	2,2	45	32,72
39	1,39	2,19	59,639	38,83
40	1,3	2,18	42,289	37,36
41	1,32	2,23	47,169	37,18
42	1,35	2,17	53,386	38,35
43	1,27	2,21	42,831	36,49
44	1,3	2,17	46,627	37,46
45	1,2	2,23	42,831	34,99
46	1,27	2,23	44,458	36,29
47	1,28	2,25	50,964	36,26
48	1,21	2,25	45	34,97
49	1,17	2,18	42,831	34,93
50	1,19	2,18	40,663	35,31
51	1,18	2,19	52,048	35,01
52	1,05	2,29	45,542	31,44
53	1,11	2,32	55,843	32,36
54	1,31	2,33	69,398	35,99
55	1,38	2,31	48,253	37,40
56	1,39	2,35	48,253	37,17
57	1,14	2,35	53,675	32,66

58	1,14	2,34	48,795	32,76
59	1,2	2,35	47,711	33,80
60	1,09	2,37	57,47	31,50
61	1,19	2,38	57,47	33,33
62	1,18	2,41	48,253	32,87
63	1,16	2,38	51,506	32,77
64	1,11	2,37	47,169	31,90
65	1,36	2,39	48,795	36,27
66	1,14	2,4	56,928	32,20
67	1,08	2,43	50,422	30,77
68	1,07	2,41	49,337	30,75
69	1,29	2,38	56,928	35,15
70	1,2	2,37	54,759	33,61
71	1,22	2,34	82,952	34,27
72	1,29	2,34	51,506	35,54
73	1,11	2,36	50,964	31,99
74	1,08	2,4	64,518	31,03
75	1,27	2,39	66,687	34,70
76	1,13	2,38	48,795	32,19
77	1,2	2,42	45,542	33,15
78	1,08	2,39	65,602	31,12
79	1,07	2,43	47,711	30,57
80	1,97	2,35	53,675	45,60
81	1,07	2,49	65,602	30,06
82	1,11	2,49	48,795	30,83
83	1,68	2,59	50,964	39,34
84	0,9	2,63	51,506	25,50
85	0,98	2,62	55,301	27,22
86	1	2,62	51,506	27,62
87	1	2,57	59,096	28,01
88	1,39	2,52	53,675	35,55

89	1,25	2,53	54,217	33,07
90	0,91	2,59	54,759	26,00
91	0,79	2,55	62,349	23,65
92	0,83	2,65	60,723	23,85
93	1	2,49	74,277	28,65
94	1,05	2,43	68,855	30,17
95	0,88	2,36	58,554	27,16
96	0,85	2,38	55,843	26,32
97	0,84	2,39	60,181	26,01
98	0,85	2,37	62,349	26,40
99	0,84	2,38	66,687	26,09
100	0,82	2,41	68,855	25,39

Tabela A. 8 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 10$ cm/s e $V_l = 18$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s^{-1})
1	0,959995657	120103
10	0,785679041	177763
20	0,796529349	157613
30	0,786608028	144869
40	0,766010979	164699
50	0,750023032	190951
60	0,747715856	167310
70	0,746499603	172096
80	0,828766981	119081
90	0,716495171	186077
100	0,688734619	224130

**APÊNDICE B – Dados dos ensaios de filtração de gases para os meios filtrantes Rad
Mais e Rad Plus com $V_f = 5$ cm/s e $V_l = 13$ cm/s e 18 cm/s**

Tabela B. 1 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 5$ cm/s e $V_l = 13$ cm/s

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm ²)	Massa Retida (g/cm ²)	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)	Eficiência de Remoção (%)
1	2,11	1,11	0,000	65,53
2	1,9	1,3	12,470	59,38
3	1,56	1,36	11,386	53,42
4	1,39	1,46	14,639	48,77
5	1,34	1,56	18,976	46,21
6	1,31	1,71	18,976	43,38
7	1,44	1,7	20,602	45,86
8	1,5	1,68	24,940	47,17
9	0,77	1,74	28,735	30,68
10	0,88	1,77	32,530	33,21
11	0,81	1,82	27,651	30,80
12	0,68	1,91	27,651	26,25
13	0,65	1,94	27,108	25,10
14	0,54	2,08	29,819	20,61
15	0,57	2,11	34,157	21,27
16	0,57	2,13	44,458	21,11
17	0,65	2,12	33,614	23,47
18	0,63	2,15	35,783	22,66
19	0,61	2,17	41,747	21,94
20	0,63	2,19	40,120	22,34
21	0,6	2,23	30,361	21,20
22	0,74	2,17	37,410	25,43
23	0,69	2,21	34,157	23,79
24	0,7	2,24	34,699	23,81

25	0,64	2,26	39,036	22,07
26	0,58	2,29	37,410	20,21
27	0,65	2,22	36,325	22,65
28	0,57	2,27	35,241	20,07
29	0,56	2,27	42,831	19,79
30	0,55	2,27	36,867	19,50
31	0,46	2,28	38,494	16,79
32	0,68	2,34	35,783	22,52
33	0,7	2,29	35,783	23,41
34	0,69	2,33	35,241	22,85
35	0,48	2,36	40,663	16,90
36	0,63	2,39	40,120	20,86
37	0,7	2,4	36,325	22,58
38	0,65	2,42	34,157	21,17
39	0,66	2,47	41,747	21,09
40	0,61	2,47	36,867	19,81
41	0,74	2,47	42,289	23,05
42	0,95	2,44	35,783	28,02
43	0,67	2,47	35,783	21,34
44	0,67	2,48	41,205	21,27
45	0,68	2,45	37,952	21,73
46	0,77	2,42	39,036	24,14
47	0,8	2,42	35,783	24,84
48	0,73	2,48	35,783	22,74
49	0,44	2,52	39,036	14,86
50	0,85	2,37	45,000	26,40
51	0,69	2,47	37,410	21,84
52	0,4	2,61	45,542	13,29
53	0,34	2,6	38,494	11,56
54	0,17	2,7	36,867	5,92
55	0,23	2,68	37,410	7,90

56	0,31	2,75	36,867	10,13
57	0,25	2,76	43,373	8,31
58	0,23	2,75	50,964	7,72
59	0,26	2,7	43,373	8,78
60	0,42	2,7	46,084	13,46
61	0,28	2,71	42,831	9,36
62	0,36	2,66	46,627	11,92
63	0,2	2,67	48,253	6,97
64	0,25	2,68	47,169	8,53
65	0,28	2,66	45,542	9,52
66	0,38	2,65	47,711	12,54
67	0,28	2,66	46,627	9,52
68	0,25	2,62	47,711	8,71
69	0,3	2,61	50,964	10,31
70	0,26	2,61	52,048	9,06
71	0,5	2,62	54,217	16,03
72	0,47	2,59	45,000	15,36
73	0,38	2,58	48,253	12,84
74	0,45	2,58	48,795	14,85
75	0,29	2,56	54,217	10,18
76	0,35	2,61	45,000	11,82
77	0,31	2,64	47,169	10,51
78	0,43	2,56	49,337	14,38
79	0,32	2,55	46,627	11,15
80	0,31	2,53	50,964	10,92
81	0,4	2,53	52,590	13,65
82	0,33	2,56	52,048	11,42
83	0,23	2,55	50,422	8,27
84	0,26	2,55	50,422	9,25
85	0,37	2,57	50,964	12,59
86	0,26	2,54	50,964	9,29

87	0,24	2,53	53,133	8,66
88	0,27	2,54	52,590	9,61
89	0,25	2,52	53,133	9,03
90	0,23	2,55	54,759	8,27
91	0,45	2,62	55,301	14,66
92	0,38	2,61	47,711	12,71
93	0,35	2,65	44,458	11,67
94	0,41	2,6	52,048	13,62
95	0,29	2,65	46,084	9,86
96	0,5	2,62	46,084	16,03
97	0,51	2,63	45,542	16,24
98	0,34	2,61	51,506	11,53
99	0,39	2,62	50,422	12,96
100	0,33	2,6	53,675	11,26

Tabela B. 2 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 5 \text{ cm/s}$ e $V_l = 13 \text{ cm/s}$

Número de ciclos	Porosidade	$K_2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$
1	0,854116188	122970
10	0,66466927	224916
20	0,614010181	196306
30	0,58472873	241626
40	0,605386399	230154
50	0,615105576	222444
60	0,551293116	243006
70	0,485751171	299766
80	0,489810578	330612
90	0,486446922	399686
100	0,50754393	319882

Tabela B. 3 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 5 \text{ cm/s}$ e $V_l = 18 \text{ cm/s}$

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm^2)	Massa Retida (g/cm^2)	Perda de Carga Residual (mmH_2O)	Eficiência de Remoção (%)
1	3,18	0,54	0,000	85,48
2	2,77	0,72	4,337	79,37
3	3	0,75	9,759	80,00
4	3,46	0,72	7,590	82,78
5	2,29	0,78	11,928	74,59
6	3,3	0,79	10,301	80,68
7	4,3	0,81	14,096	84,15
8	5,17	0,84	18,976	86,02
9	7,94	0,86	21,687	90,23
10	2,52	0,97	19,518	72,21
11	2,28	0,98	16,265	69,94
12	2,52	1,05	11,386	70,59
13	2,45	1,03	18,976	70,40
14	2,56	1,03	21,687	71,31
15	2,48	1,07	21,687	69,86
16	4,15	1,06	24,940	79,65
17	1,99	1,13	21,687	63,78
18	3,38	1,06	28,735	76,13
19	4,05	1,1	24,940	78,64
20	5,59	1,08	28,193	83,81
21	4,17	1,08	27,108	79,43
22	4,63	1,13	26,566	80,38
23	2,25	1,15	30,904	66,18
24	3,93	1,23	26,566	76,16
25	10,29	1,23	31,446	89,32
26	2,81	1,21	30,361	69,90

27	2,37	1,22	27,651	66,02
28	1,83	1,26	30,361	59,22
29	1,76	1,26	23,313	58,28
30	2,1	1,26	27,108	62,50
31	1,61	1,31	27,108	55,14
32	2,65	1,27	26,566	67,60
33	1,72	1,35	36,867	56,03
34	1,9	1,34	28,735	58,64
35	1,39	1,38	36,867	50,18
36	1,65	1,41	26,024	53,92
37	1,85	1,37	27,651	57,45
38	1,33	1,44	33,614	48,01
39	3,39	1,31	35,783	72,13
40	2,05	1,47	12,470	58,24
41	5,94	1,53	19,518	79,52
42	3,51	1,64	27,108	68,16
43	2,81	1,53	20,602	64,75
44	4,57	1,55	19,518	74,67
45	1,67	1,57	37,410	51,54
46	0,9	1,74	29,277	34,09
47	0,69	1,79	30,904	27,82
48	0,75	1,83	25,482	29,07
49	0,69	1,89	34,157	26,74
50	0,82	1,84	26,024	30,83
51	0,68	1,87	22,229	26,67
52	0,64	1,93	27,108	24,90
53	0,67	2,03	21,687	24,81
54	0,77	1,98	22,229	28,00
55	0,73	1,89	24,398	27,86
56	0,78	1,89	26,024	29,21
57	0,83	1,93	30,361	30,07

58	1,44	1,79	26,024	44,58
59	1	1,89	34,699	34,60
60	0,94	1,98	27,651	32,19
61	1,26	1,85	29,819	40,51
62	1,3	1,87	24,940	41,01
63	1,01	1,86	24,940	35,19
64	0,99	1,83	27,651	35,11
65	1,26	1,81	29,277	41,04
66	0,96	1,87	27,651	33,92
67	0,75	1,91	26,566	28,20
68	0,7	1,92	25,482	26,72
69	0,64	1,95	28,193	24,71
70	0,66	2,02	30,361	24,63
71	0,76	1,94	29,277	28,15
72	0,76	1,89	27,651	28,68
73	0,75	1,86	33,072	28,74
74	0,78	1,88	36,867	29,32
75	0,71	1,88	35,241	27,41
76	0,77	1,9	27,108	28,84
77	0,75	1,89	33,614	28,41
78	0,77	1,92	28,735	28,62
79	0,87	1,94	36,325	30,96
80	0,72	1,98	30,904	26,67
81	0,69	1,97	34,157	25,94
82	0,69	1,97	38,494	25,94
83	0,8	1,98	34,157	28,78
84	0,69	1,97	37,952	25,94
85	0,79	1,94	28,735	28,94
86	0,66	1,92	33,614	25,58
87	0,59	1,9	27,108	23,69
88	0,55	1,91	30,361	22,36

89	0,65	1,91	28,193	25,39
90	0,64	1,94	30,904	24,81
91	0,68	1,93	34,699	26,05
92	0,6	1,95	29,819	23,53
93	0,72	1,93	36,325	27,17
94	0,66	1,92	28,735	25,58
95	0,7	1,94	30,904	26,52
96	0,61	1,92	28,193	24,11
97	0,58	1,96	30,904	22,83
98	0,56	1,99	30,361	21,96
99	0,58	2,03	37,410	22,22
100	0,63	2,02	28,735	23,77

Tabela B. 4 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Plus com $V_f = 5$ cm/s e $V_l = 18$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s ⁻¹)
1	0,870175593	101638
10	0,8152247	97688
20	0,936348975	35846
30	0,793590996	97256
40	0,801369704	92492
50	0,624930081	199268
60	0,674943068	138248
70	0,624411993	192772
80	0,6321333	183020
90	0,611469658	185800
100	0,610003078	244856

Tabela B. 5 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 5 \text{ cm/s}$ e $V_l = 13 \text{ cm/s}$

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm ²)	Massa Retida (g/cm ²)	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)	Eficiência de Remoção (%)
1	2,05	1,44	0,000	58,74
2	1,79	1,7	10,301	51,29
3	1,67	1,84	10,301	47,58
4	1,63	1,91	12,470	46,05
5	1,51	1,98	15,181	43,27
6	1,99	2,15	18,434	48,07
7	1,34	2,17	18,434	38,18
8	1,61	2,2	17,349	42,26
9	1,39	2,11	17,892	39,71
10	1,06	2,13	24,940	33,23
11	1,34	2,1	20,060	38,95
12	1,9	2,16	18,976	46,80
13	1,8	2,09	18,976	46,27
14	1,71	2,09	17,892	45,00
15	1,34	2,35	24,398	36,31
16	0,47	2,51	27,108	15,77
17	0,46	2,62	26,024	14,94
18	0,5	2,68	29,277	15,72
19	0,54	2,81	35,783	16,12
20	0,66	2,78	27,108	19,19
21	0,74	2,85	27,651	20,61
22	1,02	2,77	29,277	26,91
23	0,86	2,77	28,193	23,69
24	0,82	2,78	27,108	22,78
25	0,98	2,83	48,795	25,72
26	1,35	2,83	32,530	32,30

27	1,06	2,65	28,193	28,57
28	1,19	2,63	28,193	31,15
29	1,21	2,59	32,530	31,84
30	1,03	2,46	36,867	29,51
31	1,11	2,49	27,108	30,83
32	1,45	2,54	29,819	36,34
33	1,35	2,58	35,783	34,35
34	2,18	2,5	36,867	46,58
35	1,67	2,55	27,108	39,57
36	1,42	2,55	34,699	35,77
37	1,99	2,53	36,325	44,03
38	1,77	2,53	33,614	41,16
39	1,75	2,48	27,108	41,37
40	1,63	2,43	43,373	40,15
41	1,68	2,44	28,735	40,78
42	1,77	2,39	27,108	42,55
43	1,52	2,46	33,072	38,19
44	1,53	2,48	32,530	38,15
45	1,85	2,44	43,373	43,12
46	2,27	2,28	35,241	49,89
47	1,65	2,43	33,614	40,44
48	1,17	2,37	33,614	33,05
49	1,63	2,31	36,325	41,37
50	2,66	2,32	35,241	53,41
51	3,36	2,24	35,783	60,00
52	1,14	2,3	45,542	33,14
53	1,93	2,33	34,157	45,31
54	1,19	2,45	38,494	32,69
55	1,2	2,35	32,530	33,80
56	1,46	2,37	42,831	38,12
57	1,42	2,33	35,783	37,87

58	1,28	2,34	30,361	35,36
59	1,24	2,42	35,241	33,88
60	1,4	2,45	34,157	36,36
61	1,28	2,58	35,241	33,16
62	1,21	2,39	33,614	33,61
63	1,05	2,39	34,157	30,52
64	0,94	2,44	37,410	27,81
65	1,06	2,46	36,325	30,11
66	1,05	2,44	35,783	30,09
67	1,19	2,46	43,916	32,60
68	1,11	2,47	42,289	31,01
69	1,23	2,46	36,325	33,33
70	1,23	2,47	34,699	33,24
71	2,35	2,41	37,952	49,37
72	1,24	2,47	39,036	33,42
73	1,18	2,51	49,337	31,98
74	1,04	2,48	35,783	29,55
75	1,2	2,48	37,410	32,61
76	1,12	2,51	38,494	30,85
77	1,38	2,41	37,952	36,41
78	1,15	2,43	37,952	32,12
79	1,47	2,47	43,373	37,31
80	0,86	2,5	43,916	25,60
81	0,88	2,5	38,494	26,04
82	0,81	2,5	45,542	24,47
83	0,79	2,48	37,410	24,16
84	3,36	2,28	35,783	59,57
85	1,79	2,41	41,747	42,62
86	1,6	2,5	42,831	39,02
87	1,26	2,68	44,458	31,98
88	0,93	2,59	41,747	26,42

89	1,33	2,6	44,458	33,84
90	0,98	2,67	42,831	26,85
91	1,04	2,59	44,458	28,65
92	0,95	2,62	42,289	26,61
93	2,74	2,43	38,494	53,00
94	0,87	2,51	51,506	25,74
95	0,88	2,57	42,289	25,51
96	1,07	2,57	45,000	29,40
97	1,4	2,64	47,711	34,65
98	0,83	2,64	44,458	23,92
99	0,93	2,64	43,916	26,05
100	0,98	2,59	43,373	27,45

Tabela B. 6 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 5$ cm/s e $V_l = 13$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s ⁻¹)
1	0,859301019	143936
10	0,690257605	188740
20	0,608421698	288350
30	0,655407258	195392
40	0,749045748	119134
50	0,822106936	77962
60	0,737408898	117488
70	0,715894667	130330
80	0,659778195	169208
90	0,685099403	152616
100	0,657242889	148692

Tabela B. 7 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 5 \text{ cm/s}$ e $V_l = 18 \text{ cm/s}$

Número de ciclos	Massa Removida (g/cm^2)	Massa Retida (g/cm^2)	Perda de Carga Residual (mmH_2O)	Eficiência de Remoção (%)
1	2,74	0,87	0,000	75,90
2	2,07	1,08	5,422	65,71
3	2,1	1,1	7,048	65,63
4	1,92	1,23	8,133	60,95
5	1,91	1,28	8,675	59,87
6	2,05	1,27	8,133	61,75
7	2,07	1,28	9,759	61,79
8	6,47	1,24	16,265	83,92
9	2,38	1,24	17,892	65,75
10	2	1,33	11,928	60,06
11	2	1,4	16,807	58,82
12	1,6	1,48	14,096	51,95
13	1,98	1,52	16,807	56,57
14	2,65	1,45	20,060	64,63
15	1,93	1,57	17,349	55,14
16	2,26	1,58	15,723	58,85
17	4,67	1,44	24,940	76,43
18	3,9	1,46	23,855	72,76
19	2,45	1,53	17,349	61,56
20	2,01	1,56	17,892	56,30
21	1,88	1,72	20,060	52,22
22	1,72	1,68	20,060	50,59
23	4,13	1,52	18,434	73,10
24	2,05	1,58	20,602	56,47
25	1,31	1,7	20,602	43,52
26	1,53	1,75	17,892	46,65

27	1,57	1,8	23,313	46,59
28	2	1,77	18,976	53,05
29	1,96	1,78	28,735	52,41
30	1,67	1,82	22,771	47,85
31	2,65	1,68	16,807	61,20
32	1,68	1,79	16,807	48,41
33	1,55	1,8	18,434	46,27
34	1,99	1,74	15,723	53,35
35	1,2	1,83	21,145	39,60
36	1,47	1,87	18,434	44,01
37	1,26	1,93	24,398	39,50
38	1,22	1,97	13,554	38,24
39	1,25	1,96	24,398	38,94
40	1,25	1,97	20,602	38,82
41	1,28	2	18,976	39,02
42	1,12	2,05	23,313	35,33
43	1,76	1,87	31,988	48,48
44	1,4	1,85	18,434	43,08
45	1,83	1,78	20,060	50,69
46	1,41	1,82	22,771	43,65
47	1,45	1,89	23,855	43,41
48	1,31	1,93	18,434	40,43
49	1,59	1,88	20,060	45,82
50	1,25	1,95	23,855	39,06
51	1,43	1,98	23,313	41,94
52	1,24	1,99	23,313	38,39
53	1,09	2,05	20,060	34,71
54	1,12	2,1	22,771	34,78
55	1,45	2,01	22,771	41,91
56	1,38	2	26,024	40,83
57	1,33	1,99	18,976	40,06

58	1,33	2,02	24,398	39,70
59	1,25	2,02	18,976	38,23
60	1,15	2,05	26,024	35,94
61	1,11	2,05	24,940	35,13
62	1,26	2,02	25,482	38,41
63	1,32	2,01	23,313	39,64
64	1,12	1,99	26,024	36,01
65	0,75	2,12	24,940	26,13
66	1,09	2,1	25,482	34,17
67	0,99	2,17	33,072	31,33
68	0,99	2,16	27,108	31,43
69	1,06	2,16	26,024	32,92
70	0,99	2,23	26,566	30,75
71	1,49	1,99	25,482	42,82
72	1,42	1,97	24,398	41,89
73	1,55	1,94	21,145	44,41
74	1,23	2,02	31,446	37,85
75	1,51	2,02	23,855	42,78
76	1,7	2,05	44,458	45,33
77	1,29	2,01	31,446	39,09
78	1,43	2,05	28,193	41,09
79	1,41	2,04	23,855	40,87
80	1,86	2	31,446	48,19
81	1,22	2,08	27,108	36,97
82	1,63	2,03	35,783	44,54
83	1,32	2,11	28,735	38,48
84	1,23	2,12	27,108	36,72
85	1,46	2,17	26,024	40,22
86	0,95	2,4	33,614	28,36
87	1,3	2,45	35,783	34,67
88	2,99	2,36	29,277	55,89

89	1,35	2,38	34,699	36,19
90	1,31	2,46	30,361	34,75
91	2,12	2,36	26,024	47,32
92	1,96	2,36	37,952	45,37
93	2,59	2,37	32,530	52,22
94	1,11	2,55	52,590	30,33
95	1,32	2,61	33,614	33,59
96	1,01	2,58	31,988	28,13
97	3,36	2,47	33,614	57,63
98	1,55	2,51	43,373	38,18
99	1,11	2,65	37,410	29,52
100	0,76	2,71	40,120	21,90

Tabela B. 8 – Dados de filtração para o meio filtrante Rad Mais com $V_f = 5$ cm/s e $V_l = 18$ cm/s

Número de ciclos	Porosidade	K_2 (s ⁻¹)
1	0,829761893	132508
10	0,785123658	139324
20	0,78944604	108100
30	0,748771053	107404
40	0,704868186	147326
50	0,719478274	143258
60	0,705063558	134858
70	0,686741695	152962
80	0,769750576	80528
90	0,721962948	123054
100	0,645675809	138992