

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



*IFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS
NA FORMAÇÃO E REMOÇÃO DE TORTAS
DE FILTRAÇÃO DE GASES*

Érica Rodrigues Tognetti

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

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

*IFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES OPERACIONAIS NA FORMAÇÃO E
REMOÇÃO DE TORTAS DE FILTRAÇÃO DE GASES*

Érica Rodrigues Tognetti

Orientadora: Prof. Dra. Mônica Lopes Aguiar

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA 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
CONTROLE AMBIENTAL.*

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

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

T645ic

Tognetti, Érica Rodrigues.

Influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases / Érica Rodrigues Tognetti. -- São Carlos : UFSCar, 2007.
191 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2007.

1. Filtração de gases. 2. Limpeza de gases. 3. Filtros de tecido. I. Título.

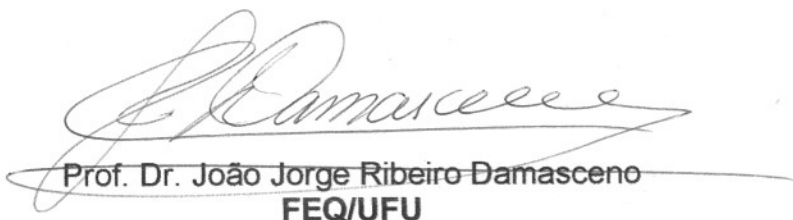
CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
ÉRICA RODRIGUES TOGNETTI, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SÃO CARLOS, EM 30 DE MARÇO DE 2007.

BANCA EXAMINADORA:



Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. João Jorge Ribeiro Damasceno
FEQ/UFU



Prof. Dr. Marcos Vinicius Rodrigues
FEQ/UFU-DEQ/UFSCar

“Que eu tenha energia para mudar aquilo que pode ser mudado, a
humildade e serenidade para aceitar aquilo que não pode ser mudado e
a sabedoria de conseguir diferenciar os dois”.

Reinold Niebulk

Aos meus pais, Márcio Adalberto Tognetti e Marilza Aparecida Rodrigues Tognetti

Ao meu irmão, Bruno Rodrigues Tognetti

AGRADECIMENTOS

Essa dissertação é fruto de dois anos de trabalho e dedicação. Foram muitos os que contribuíram para a sua realização, me ajudando com seus conhecimentos e me apoiando com amizade, carinho e compreensão.

À Deus, que tanto nos deste. Presente em todos os momentos, transmitindo-nos segurança necessária para enfrentar as dificuldades e seguir nosso caminho. Sabedoria suprema. Amor infinito.

À Prof.^a Dra. Mônica Lopes Aguiar, que, nos anos de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual. Pela amizade, atenção e apoio indispensáveis para a realização desse trabalho. Fica aqui registrada minha admiração e homenagem nessas humildes palavras.

Aos meus pais, a quem devo tudo que sou hoje. Que, com seus exemplos me ensinaram a ser justa e perseverante, me tornar responsável e humana. Por sempre acreditarem em mim e com muito carinho, amor e dedicação me ensinaram a lutar e enfrentar os obstáculos.

Agradeço também ao meu irmão, uma pessoa iluminada, que sempre esteve comigo, alegrando a minha vida.

Aos meus padrinhos, tio Zé e tia Mira pelo incentivo de sempre e por se mostrarem presentes em todos os momentos da minha vida.

Às minhas queridas tias Marialva, Nana, Magali e Marli, pelo colo, pelas conversas, pelo apoio, pela torcida.

Aos meus primos-irmãos, Igor e Ícaro. Às queridas Eloísa, Elaine, Sara e Raquel.

À vovó Celina (in memorian) e vovó Olímpia (in memorian), pessoas doces e meigas, tão importantes em minha formação. Pelo amor incondicional e pelos ensinamentos de união, perseverança e força.

Às minhas amigas desde sempre e para sempre, Karen, Marina e Paula.

Aos amigos e colegas de graduação e pós-graduação, que me acompanharam durante essa jornada. Partilhando descobertas, desafios e conquistas, dividindo as angústias e incertezas, tornando as intermináveis horas de estudos mais felizes e divertidas. Em especial a Érika, Pati, Rosana, Déia, Carol e Jú, durante a graduação. Dudu, Didi, Renatinha, Rafa, Vanessa e Jú durante a pós.

Aos amigos que fizeram desses anos os melhores da minha vida, me acompanhando em festas, esquentas, bares, piscina, viagens, congressos, à minha turma querida e inesquecível EQ00.

Aos amigos do laboratório: Vanessa, Karina, Eduardo e Paulo pela ajuda na realização de muitos ensaios, pela discussão sobre os resultados, pelo companheirismo durante esses anos de trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos pela oportunidade

RESUMO

O objetivo desse trabalho foi estudar a influência das condições operacionais na formação e remoção de tortas de filtração de gases. Ensaios de 10 ciclos de filtração e de limpeza foram realizados, com o intuito de avaliar a influência da espessura da torta de filtração, velocidade de filtração e velocidade de limpeza na regeneração de três tecidos diferentes, no caso, acrílico, poliéster e polipropileno. Foram utilizadas velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s e velocidades de filtração de 5 e 10 cm/s, com perda de carga máxima de 20, 40 e 60 cmc.a.. Concentrado fosfático com diâmetro volumétrico médio de 4,5 μm foi utilizado como material particulado. Para caracterizar a limpeza do tecido, foi utilizada a técnica de fotografar o filtro após cada ciclo de limpeza, obtendo imagens do destacamento parcial das tortas. Essas imagens dos ciclos 1, 2, 3, 5 e 10 foram estudadas e avaliadas através de um software analisador de imagens, o Image-Pro Plus. Foram analisadas a eficiência de regeneração e o tamanho das áreas regeneradas do filtro, obtendo informações a respeito da influência da estrutura do tecido sobre a remoção e forma dos patches. Os resultados mostraram que, para tortas mais espessas, a perda de carga residual foi mais elevada, independente da massa retida. Maiores velocidades de filtração não são necessariamente as que proporcionam melhor regeneração do tecido. Ao observar-se o fenômeno de remoção por blocos não houve um comportamento definido ao longo dos ciclos. Os resultados obtidos indicaram que o acrílico foi mais apropriado para a filtração do concentrado fosfático, nas condições experimentais investigadas, por apresentar uma menor taxa de perda de carga em função da carga mássica, o que torna a operação economicamente mais vantajosa, diminuindo as interrupções no processo, para a limpeza do meio filtrante, o que também diminui o desgaste do tecido.

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the influence of some operational variables on the filtration process and cake detachment, and also the patchy cleaning phenomenon. The studied conditions were maximum pressure drop, 20, 40 and 60 cmc.a., filtration velocity, 5 and 10 cm/s, cleaning velocity, 10 and 15 cm/s and thickness of the cake. Phosphoric rock dust with Stokes diameters of 4,5 μm was used as powder material. The filter medium used was acrylic, polyester and polypropylene needlefelt. To characterize the cleanness of the fabric, it was used the technique to take a photograph of the filter after each cycle of cleanness, getting images of the partial detachment of the cake. These images of cycles 1, 2, 3, 5 and 10 had been studied and analyzed through analytical software of images, the Image-Pro Plus. The efficiency of regeneration and the size of the regenerated areas of the filter had been analyzed. The results showed that the residual pressure drop was higher for thicker cakes. The higher cleaning velocity was not necessarily the one that offers better cake removal. Concerning the patchy cleaning phenomenon, total area removed did not present a defined behavior with the number of cycles. The results also showed that acrylic needlefelt is the best one to this process. This filter medium requires regeneration less frequently as it presents a lower pressure drop tax. As consequence the process is more economic and the filter medium can me used for longer periods of time.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Coleta de partículas.....	8
Mecanismo difusional.....	8
Mecanismo inercial.....	9
Mecanismo de Intercepção direta.....	10
Mecanismo gravitacional.....	11
Deposição eletrostática.....	12
2.2 Formação de tortas.....	13
2.3 Perda de carga	16
2.4 Valor experimental da resistência específica da torta (k_c).....	19
2.5 Permeabilidade do meio filtrante.....	20
2.6 Porosidade do meio filtrante e diâmetro dos poros.....	21
2.7 Porosidade da torta.....	23
2.8 Velocidade de filtração.....	24
2.9 Arraste efetivo.....	26
2.10 Ciclo de filtração.....	27
Comportamento ideal de ciclos de filtração.....	28
Comportamento real de ciclos de filtração	29
Comportamento de funcionamento real com regeneração incompleta....	30
2.11 Técnicas de limpeza dos filtros.....	31
Vibração mecânica.....	31
Fluxo de ar reverso.....	32
Pulso de ar reverso.....	33
2.12 Remoção por blocos.....	34

2.13 Tecidos utilizados em filtros manga.....	37
Tecidos trançados.....	41
Tecidos não trançados.....	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
3.1 Materiais.....	45
3.1.1 Material particulado.....	45
3.1.2 Meios filtrantes.....	46
Caracterização dos meios filtrantes.....	48
3.2 Equipamento de filtração.....	48
3.2.1 Sistema de alimentação de pó.....	48
3.2.2 Caixa de filtração.....	50
3.2.3 Medidores de vazão e queda de pressão.....	51
3.2.4 Direcionamento do fluxo.....	51
3.2.5 Controle da umidade.....	52
3.3 Ensaios.....	52
3.3.1 Filtração.....	52
3.3.2 Remoção da torta.....	53
3.3.3 Análise das imagens.....	55
3.4 Planejamento experimental.....	55
3.4.1 Cálculo da vazão de alimentação de pó.....	56
3.4.2 Cálculo da carga mássica.....	56
3.4.3 Cálculo da porosidade.....	58
3.4.4 Cálculo da resistência específica da torta (kc').....	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	60
4.1 Influência da estrutura do tecido na filtração e regeneração do tecido	60
4.2 Influência da espessura da torta na filtração e regeneração do tecido	83
4.3 Influência da velocidade de limpeza na filtração e regeneração do tecido	100
4.4 Influência da velocidade de filtração no processo de filtração e regeneração do tecido.....	114
4.5 Análise dos <i>patches</i> removidos.....	124

4.5.1 Influência da velocidade de limpeza na área total removida para diferentes tecidos.....	125
5 CONCLUSÕES.....	145
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	148
REFERÊNCIAS.....	149
APÊNDICE A: Resultados Experimentais.....	154
APÊNDICE B: Tamanho dos Patches Removidos.....	183

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>A</i>	Área superficial de filtração [L²]
<i>B</i>	Coefficiente de permeabilidade do meio filtrante [L³ t² M⁻¹]
<i>D</i>	Coefficiente de difusão da partícula [t L⁻²]
<i>d_f</i>	Diâmetro das fibras [L]
<i>d_p</i>	Diâmetro de partículas [L]
<i>k_c</i>	Resistência específica da torta [t⁻¹]
<i>k_m</i>	Resistência específica do meio filtrante [M L⁻² t⁻²]
<i>L</i>	Espessura do meio filtrante [L]
<i>L_c</i>	Espessura da torta de filtração [L]
<i>M</i>	Massa de torta [M]
<i>Q</i>	Vazão mássica de pó [M t⁻¹]
<i>R</i>	Parâmetro adimensional de Rubow e Liu [-]
<i>Pe</i>	Número de Peclet [-]
<i>S</i>	Arraste Efetivo [M L⁻² t⁻¹]
<i>S_t</i>	Número de Stokes [-]
<i>t</i>	Tempo de filtração [t]
<i>V_F</i>	Velocidade superficial de filtração [L t⁻¹]
<i>v_p</i>	Velocidade do fluido nos poros [L t⁻¹]
<i>W</i>	Massa de pó depositada por unidade de área [M L⁻²]
<i>W_R</i>	Massa residual de pó por unidade de área [M L⁻²]

LETRAS GREGAS

α	Coefficiente de resistência viscosa [L^{-2}]
ΔP	Perda de Carga [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_C	Queda de pressão devido à formação da torta de filtração [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_m	Queda de pressão no meio filtrante [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_{max}	Perda de carga máxima admitida [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_R	Perda de carga residual [$M L^{-1} t^{-2}$]
ΔP_T	Queda de pressão total no filtro [$M L^{-1} t^{-2}$]
ε	Porosidade [-]
μ_g	Viscosidade do gás [$M L^{-1} t^{-1}$]
ρ_g	Densidade do gás [$M L^{-3}$]
ρ_p	Densidade das partículas [$M L^{-3}$]

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Coleta de partícula por difusão.....	8
Figura 2.2	Coleta de partícula pelo mecanismo inercial.....	10
Figura 2.3	Coleta de partícula por interceptação direta.....	11
Figura 2.4	Coleta de partícula pelo mecanismo gravitacional.....	12
Figura 2.5	Coleta de partículas por deposição eletrostática.....	13
Figura 2.6	Esquema de formação de dentritos.....	14
Figura 2.7	(a) Formação de dentritos no interior do meio filtrante; (b) formação da torta de filtração na superfície do meio filtrante.....	14
Figura 2.8	Determinação do ponto de colmatção do meio filtrante.....	15
Figura 2.9	Determinação do arraste efetivo nos estágios iniciais de filtração.....	27
Figura 2.10	Comportamento ideal de filtração com velocidade de fluxo e concentração de pó constante.....	29
Figura 2.11	Comportamento real com a aglutinação de pó compressível em comparação com o comportamento ideal com velocidade de fluxo e concentração de pó constante.....	30
Figura 2.12	Comportamento de ciclos de filtração em caso de regeneração incompleta (também “ <i>patchy cleaning</i> ”) com velocidade de fluxo e concentração de pó constante.....	31
Figura 2.13	Limpeza por Vibração Mecânica.....	33
Figura 2.14	Limpeza por fluxo de ar reverso.....	34
Figura 2.15	Limpeza por pulso de ar reverso.....	35
Figura 2.16	Ilustração do <i>patchy cleaning</i>	36
Figura 2.17	Tipos de tecidos trançado (DAVIS, 1992).....	43
Figura 3.1	Distribuição granulométrica do diâmetro médio volumétrico obtida no Malvern e do diâmetro aerodinâmico obtida no HORIBA.....	45

Figura.3.2	Microscopia eletrônica de varredura dos tecidos testados. Aumento de 50X: (a) Acrílico; (b) Poliéster ; (c) Polipropileno.....	47
Figura 3.3	Equipamento de Filtração.....	48
Figura 3.4	Sistema de alimentação de pó.....	49
Figura 3.5	Caixa de filtração.....	50
Figura 3.6	(a) Filtro com a torta de filtração após o primeiro ciclo de filtração e (b) filtro parcialmente limpo.....	54
Figura 3.7	(a) Pedacos de torta destacados na limpeza e (b) áreas marcadas, através do Programa de análise de Imagens, dos pedacos de torta destacados na limpeza.....	55
Figura 4.4.1	Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 10 cm/s.....	61
Figura 4.1.2	Ciclos de filtração: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa, velocidades de limpeza de 10 cm/s e acrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrante.....	62
Figura 4.1.3	Primeiro ciclo de filtração para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.	64
Figura 4.1.4	Massa coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	65
Figura 4.1.5	Características da torta para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta.....	66
Figura 4.1.6	(a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	67
Figura 4.1.7	Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	68
Figura 4.1.8	Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de	

	limpeza de 15 cm/s.....	69
Figura 4.1.9	Ciclos de filtração: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa, velocidades de limpeza de 15 cm/s e acrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrante.....	70
Figura 4.1.10	Massa coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	71
Figura 4.1.11	(a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	72
Figura 4.1.12	Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	73
Figura 4.1.13	Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 cm/s.....	74
Figura 4.1.14	Ciclos de filtração: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1920 Pa, velocidades de limpeza de 10 cm/s e acrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrante.....	75
Figura 4.1.15	Massa coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	76
Figura 4.1.16	Características da torta coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa .(a) porosidade e (b) resistência específica da torta.....	76
Figura 4.4.17	(a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	77
Figura 4.1.18	Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	78
Figura 4.1.19	Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 15 cm/s.....	79
Figura 4.1.20	Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de	

	limpeza de 15 cm/s.....	80
Figura 4.1.21	Massa coletada para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 15 cm/s.....	81
Figura 4.1.22	Características da torta coletada para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 15 cm/s. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta.....	82
Figura 4.1.23	(a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	82
Figura 4.1.24	Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.....	83
Figura 4.2.1:	Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.....	86
Figura 4.2.2	Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.....	87
Figura 4.2.3	Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.....	89
Figura 4.2.4	Massa coletada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.....	90
Figura 4.2.5	Massa retida e massa removida após a limpeza em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.	91
Figura 4.2.6	Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	92
Figura 4.2.7	Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e	

	3920 Pa.....	93
Figura 4.2.8	Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.....	94
Figura 4.2.9	Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.....	95
Figura 4.2.10	Primeiro ciclo de filtração com velocidade de filtração igual a 5 cm/s, velocidade de limpeza igual a 10 cm/s. (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	96
Figura 4.2.11	Massa retida e massa removida após a limpeza em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.	97
Figura 4.2.12	Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	98
Figura 4.3.1	Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s.....	102
Figura 4.3.2	Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s.....	103
Figura 4.3.3	Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s.....	104
Figura 4.3.4	Massa retida acumulada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e velocidade de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	105
Figura 4.3.5	Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e velocidade de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	106
Figura 4.3.6	Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s.....	109
Figura 4.3.7	Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 e 15	

	cm/s.....	110
Figura 4.3.8	Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s.....	112
Figura 4.3.9	Massa coletada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	113
Figura 4.3.10	Massa retida acumulada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	113
Figura 4.3.11	Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.....	114
Figura 4.4.1	Ciclos de filtração utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	116
Figura 4.4.2	Massa coletada utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	117
Figura 4.4.3	Características da torta formada utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta.....	118
Figura 4.4.4	(a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	119
Figura 4.4.5	Perda de carga residual utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	119
Figura 4.4.6	Ciclos de filtração utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	121
Figura 4.4.7	Massa coletada utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	122
Figura 4.4.8	Características da torta formada utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades	

	de filtração. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta.....	122
Figura 4.4.9	(a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	123
Figura 4.4.10	Perda de carga residual utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração.....	123
Figura 4.5.1	Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 10 cm/s.....	126
Figura 4.5.2	Área total removida pela velocidade de limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	127
Figura 4.5.3	Área total removida em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	128
Figura 4.5.4	Área total removida em função do número de ciclos para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	129
Figura 4.5.5	Número de patches removidos em função da velocidade de limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	132
Figura 4.5.6	Número de patches removidos em função do número de ciclos para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	133
Figura 4.5.7	Influência da velocidade de limpeza na variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho para o primeiro ciclo de filtração, com perda de carga máxima de 3920 Pa.....	134
Figura 4.5.8	Acrílico (a) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos na área total removida e (b) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	136
Figura 4.5.9	Poliéster (a) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos na área total removida e (b) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	137

Figura 4.5.10	Polipropileno (a) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos na área total removida e (b) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3920 Pa.....	138
Figura 4.5.11	Frações de limpeza em função do número de ciclos para diferentes velocidades de filtração (a) acrílico e (b) polipropileno.....	139
Figura 4.5.12	Área total removida em função do número de ciclos para diferentes velocidades de filtração.....	140
Figura 4.5.13	Número de patches removidos em função do número de ciclos para diferentes V_F	141
Figura 4.5.14	Número de <i>patches</i> removidos em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa (a)acrílico, (b)poliéster e (c)polipropileno.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Propriedades das fibras. (Fonte: DONOVAN, 1985).....	42
Tabela 3.1 - Descrição dos meio filtrantes empregados (dados do fornecedor)..	47
Tabela 3.2 - Caracterização dos meios filtrantes.....	48
Tabela 3.3 - Esquema dos ensaios a realizados.....	60
Tabela 4.1.1 - Ponto de colmatação para diferentes tecidos.....	63
Tabela 4.2.1 - Massa retida para as diferentes condições operacionais estudadas.....	99
Tabela 4.5.1 - Metodologia utilizada na classificação do tamanho dos patches removidos.....	133

1 INTRODUÇÃO

Poluente atmosférico é qualquer tipo de matéria (material particulado ou gases e vapores) presente na atmosfera de forma anormal ou em concentrações maiores do que o normal. No Brasil, foi proposta uma resolução do CONAMA nº 3 de 28/06/1990 estabelecendo os Padrões de Qualidade do Ar válidos para todo o território nacional. Os poluentes considerados nessa resolução foram: partículas totais em suspensão (PTS); dióxido de enxofre (SO₂); monóxido de carbono (CO); ozônio (O₃); dióxido de nitrogênio (NO₂), fumaça e partículas inaláveis. Foram estabelecidos Padrões Primários, destinados à proteção da saúde pública e Padrões Secundários, para proteção do meio ambiente em geral e do bem-estar da população.

Ao se tratar de saúde pública, o material particulado de maior interesse são as partículas inaláveis. Essas partículas podem possuir propriedades tóxicas, cancerígenas, alérgicas e serem inaladas pelo sistema respiratório e retidas no pulmão. Elas também podem promover ligações cruzadas dos tecidos pulmonares tornando-os rígidos, dificultando o processo respiratório (DERISIO, 1992).

O primeiro conceito de padrão de qualidade do ar referente ao material particulado foi criado nos EUA, em 1971, conhecido como particulado total em suspensão (PTS). Em 1987 foi estabelecido um novo padrão pela EPA, Agência de Proteção Ambiental dos EUA, conhecido como material particulado inalável, PM10, definido por partículas com diâmetro nominal menor ou igual a 10 µm, isto porque essas partículas quando inaladas tendem a ficar retidas no pulmões. Em 1997 esse padrão foi revisado, chegando-se ao padrão de qualidade do ar referente a fração fina do PM10, constituída por partículas com diâmetro nominal menor ou igual a 2,5 µm, PM2,5, considerada mais prejudicial a saúde (ACGIH, 1991).

A grande maioria das indústrias, dos mais diversos segmentos, como cimento, gesso, cerâmica, borracha, química, petroquímica, siderúrgica, automobilística, cal, mineração, amianto, alumínio, ferro, coque, silicatos, amidos, carvão, anilinas, fibras de grãos, entre outras, gera material particulado em algum de seus estágios de processo. Além disso, existe uma grande demanda de produtos na forma pulverulenta. Como hoje em dia a legislação exige um controle de poluição mais efetivo, a emissão dessas substâncias para o meio ambiente via água ou ar é monitorada por agências governamentais. Com isso, o projeto e a instalação de equipamentos de limpeza de efluentes tem se tornado cada vez mais criteriosa. A indústria, a fim de controlar a emissão de material particulado para o ambiente, deve escolher um equipamento de limpeza eficiente e com o menor custo de capital e de operação.

A filtração de ar é um dos métodos mais comuns na coleta de material particulado, por se tratar de um equipamento de alta eficiência e também por ser pouco sensível às flutuações nas condições de operações (HINDS, 1982).

Em uma operação de filtração de gases, se faz com que o gás contendo as partículas suspensas passe através do meio filtrante, no caso as mangas, que as retém, liberando ar limpo. Inicialmente, o meio filtrante é o único responsável pela filtração. Durante a operação, a resistência ao fluxo aumenta, já que ocorre a deposição do material filtrado no filtro, que vai sendo obstruído, formando a torta de filtração, também conhecida como *cake*. A partir desse momento a torta passa a exercer o papel de superfície filtrante.

Com o passar do tempo, durante a filtração, ou a vazão diminui ou a queda de pressão aumenta. A filtração pode ser realizada de duas maneiras, mantendo-se vazão constante ou mantendo-se a queda de pressão constante. Ao atingir-se uma pré-determinada espessura da torta é necessário realizar-se a limpeza do tecido.

Com o desenvolvimento de novas fibras sintéticas o emprego de filtros manga nas indústrias tornou-se ainda maior, devido a ampla a faixa de aplicação destes equipamentos, principalmente sob condições críticas de operação, como temperaturas mais elevadas e situações de abrasão ou corrosão.

Sendo assim, há uma grande importância de estudos dos filtros com a finalidade de promover melhorias de seu desempenho a fim de promover processos mais econômicos, minimizando o consumo energético e aumentando sua vida útil.

Neste contexto, é compreensível a filtração de partículas sólidas ser objeto de numerosos estudos. No laboratório de Controle Ambiental da Universidade Federal de São Carlos existe uma equipe especializada nesse assunto. Martins (2001) estudou a estrutura e as propriedades inerentes ao meio filtrante no processo de filtração de aerossóis em filtros de poliéster. Foram analisadas velocidades de filtração de 5 e 10 cm/s sendo verificado que a profundidade de deposição de pó não foi homogênea para diferentes regiões do tecido sendo que, para a maior velocidade de filtração, a profundidade de deposição foi maior e a permeabilidade variou com o número de ciclos para uma dada massa de pó residual.

Ito (2002) estudou a porosidade de tortas de filtração de gases. Para isso desenvolveu uma nova técnica utilizando um Microscópio Óptico (MO) para obter imagens da estrutura da camada de pó depositada na superfície do meio filtrante e, a partir da análise dessas imagens, obter os valores de porosidade das tortas. Essa técnica mostrou-se eficiente e economicamente mais vantajosa que a análise utilizando o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Utilizando a técnica do Microscópio Óptico Ito (2002) estudou a influência da velocidade de filtração, e do material particulado, utilizando polvilho doce, amido de milho e concentrado fosfático, na estrutura da torta de filtração formada. Concluiu que a porosidade diminuiu com o

aumento da velocidade superficial de filtração e que o formato das partículas e sua distribuição granulométrica exerceram grande influência na porosidade da torta.

Tieni (2005) estudou o fenômeno de remoção por blocos utilizando o poliéster como meio filtrante, para diferentes valores de perda de carga máxima e velocidades de limpeza. Em seu trabalho foi constatado que, para tortas mais finas, a saturação ocorre mais cedo, no segundo ciclo, enquanto para tortas mais espessas a saturação ocorre a partir do quarto ciclo. Concluiu também que a maior velocidade de limpeza não foi a mais eficiente. Quanto a distribuição dos pedaços removidos, foi verificado que a maior porcentagem tinha áreas entre 0,1 e 1 cm².

Rodrigues (2006) estudou a profundidade de penetração no interior dos filtros após a limpeza utilizando diferentes meios filtrantes e como material particulado rocha fosfática fina, grossa e polvilho doce. Em seu trabalho foi constatado que, apesar da heterogeneidade do meio filtrante houve um acúmulo de partículas nas camadas superiores do tecido, que diminuía com a profundidade. Ficou constatado também que para o polipropileno, tecido com menor permeabilidade e porosidade, houve menor retenção de partículas após a limpeza. No entanto este meio filtrante foi o que apresentou maior perda de carga residual e ciclos de filtração mais curtos, fatos que foram associados com a menor profundidade de penetração. Para maiores valores de perdas de carga máxima a profundidade de penetração foi maior, assim como a resistência específica da torta.

Após vários ciclos de filtração e limpeza, uma fração dos particulados fica retida permanentemente no tecido formando o meio filtrante definitivo (tecido e torta). Este fenômeno constitui a causa da alta eficiência dos filtros de mangas (maior que 99,0 – 99,9%), na filtração de pequenas partículas (LORA, 2002).

Sabe-se ainda que, apesar da filtração de partículas sólidas ser objeto de numerosos estudos, o conhecimento relativo à limpeza do meio filtrante ainda é muito escasso (CALLÉ et al., 2002b).

Durante a limpeza, freqüentemente há a remoção de algumas áreas da torta por inteiro e outras áreas permanecem retidas no tecido. Esse fenômeno é conhecido como “*patchy cleaning*”, ou limpeza por blocos (KOCH; SEVILLE; CLIFT, 1996). Como consequência, após o processo de limpeza, é gerada uma perda de carga residual (ΔP_R), já que o meio filtrante não retorna às suas propriedades iniciais, devido à torta de pó que não pode ser removida, permanecendo aderidas no tecido. Essa perda de carga residual geralmente alcança um valor constante após vários ciclos de filtração e limpeza.

Um parâmetro muito utilizado para caracterizar a limpeza por blocos, é a fração de limpeza, definida como a razão entre a área limpa do filtro e a área total de filtração (CALLÉ et al., 2002a). Essa caracterização também pode ser feita através da fração de massa (DITTLER; KASPER, 1999). A caracterização através da fração de massa é definida pela razão entre a massa de pó desprendida da torta, durante a limpeza, e a massa total da torta de pó no filtro.

Tendo esse conhecimento, esse trabalho tem a finalidade de realizar um estudo sobre o comportamento da formação e remoção de torta de filtração de gases, em diferentes condições experimentais, estudando as variáveis: velocidade de filtração, velocidade de limpeza, espessura da torta e a estrutura do tecido, utilizando o acrílico, o poliéster e o polipropileno como meio filtrante.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais fatores que influenciam no projeto de um filtro manga, eficiência de coleta, perda de carga, velocidade de filtração, tipos de tecido e as principais técnicas de limpeza utilizadas em filtros manga.

Dois parâmetros utilizados para descrever a performance de qualquer tipo de coletor de pó são: a eficiência de coleta e a perda de carga. Em geral, ambos mudam com a deposição de pó e com o envelhecimento do filtro (REMBOR; KASPER, 1998).

Como, durante a filtração há o acúmulo de aerossóis sólidos no meio filtrante e, conseqüentemente, a formação da torta, há uma crescente queda de pressão através do meio filtrante ocasionando uma melhora na performance da filtração já que, conforme a torta vai se formando, ela passa a fazer parte do filtro, aumentando a eficiência do processo.

Porém, formação de uma torta muito espessa é indesejável, pois significa um custo operacional muito elevado, sendo assim, torna-se necessária a limpeza periódica do filtro, para manter a perda de carga em níveis adequados de operação.

A melhor condição de operação de filtração de material particulado é a combinação entre a máxima eficiência de coleta e a mínima perda de carga.

2.1 Coleta de partículas

Os filtros são equipamentos que atingem altas eficiências de coleta, em alguns casos chegando a valores de eficiência maiores que 99,9%. Porém, ao contrário do que se imagina, as partículas não ficam retidas apenas por possuírem diâmetros maiores que os espaços entre as fibras. Essa idéia fica clara ao observar-se a estrutura dos filtros e também devido ao fato da eficiência de coleta depender fortemente da velocidade do gás. Comprova-se então a existência de outros mecanismos responsáveis pela retenção das partículas no meio filtrante e estão explicados a seguir.

Mecanismo Difusional

A coleta por difusão, ilustrada na Figura 2.1, resulta do movimento aleatório que as partículas de pequeno diâmetro estão sujeitas em um gás, estas se movem de uma zona de alta concentração para uma zona de baixa concentração nas proximidades do corpo coletor, no caso, uma fibra.

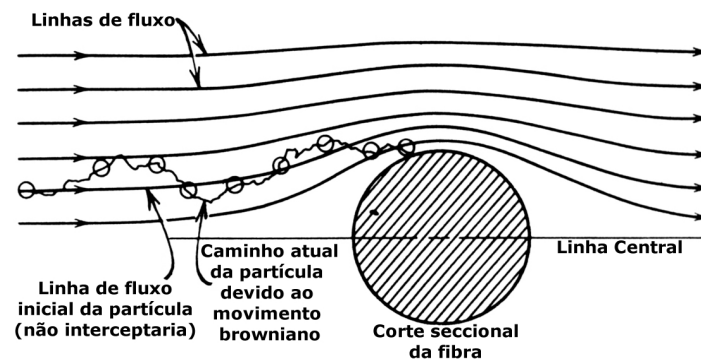


Figura 2.1. Coleta de partícula por difusão

A difusão é em grande parte um efeito do movimento browniano, que é o movimento irregular em ziguezague de partículas muito pequenas, as quais migram em direção à superfície de coleta, sendo então removidas da corrente gasosa. Este efeito é especialmente importante para partículas menores que $1\mu\text{m}$. Para partículas de

diâmetros menores, as forças inerciais tornam-se cada vez menos ativas e para partículas menores que $0,1\mu\text{m}$ este passa a ser o mecanismo de captura dominante (DULIEN, 1989). O parâmetro adimensional utilizado para descrever o grau de deposição browniana é o número de Peclet, definido pela Equação 2.1 (RUBOW; LIU, 1986):

$$Pe = \frac{v_p \cdot d_f}{D} \quad (2.1)$$

em que v_p é a velocidade do fluido nos poros, d_f é o diâmetro das fibras e D é o coeficiente de difusão da partícula. A velocidade intersticial é dada pela razão da velocidade superficial pela porosidade ($v_p = V_F / \epsilon$). A intensidade da deposição aumenta com o decréscimo do número de Peclet.

Mecanismo inercial

Este mecanismo, ilustrado na Figura 2.2 é resultante da inércia das partículas. O parâmetro para o cálculo da eficiência é o número de Stokes, o qual envolve o diâmetro e densidade das partículas, a velocidade e a viscosidade do gás, dado pela Equação (2.2)

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

em que d_p é o diâmetro de partículas, V_F é a velocidade de filtração, ρ_p é a densidade das partículas, e d_f é o diâmetro das fibras e μ_g é a viscosidade do gás.

Neste mecanismo as partículas arrastadas pela corrente gasosa, ao se aproximarem do corpo coletor (fibra), tendem a seguir na sua trajetória original em virtude da sua inércia, podendo atingir o obstáculo e serem então coletadas. É efetivo para partículas de aproximadamente 10 μm ou mais (DULIEN, 1989). A eficiência de coleta nesse mecanismo aumenta com a energia cinética das partículas.

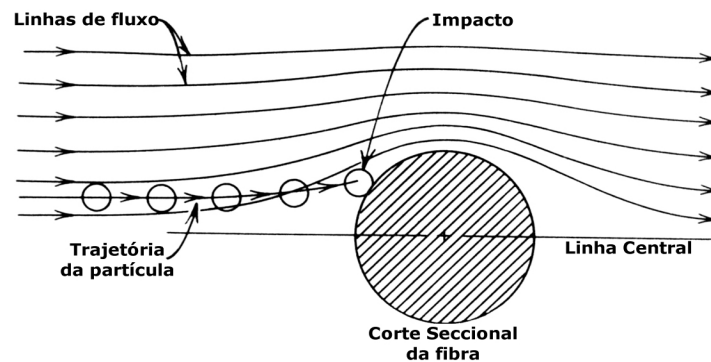


Figura 2.2. Coleta de partícula pelo mecanismo inercial

Mecanismo de Intercepção direta

Esse mecanismo de coleta é especialmente importante quando se trabalha com partículas maiores que 1 μm . A coleta ocorre quando as partículas acompanham a linha de corrente de gás, sem se deslocar dela quando se aproxima da fibra (DULIEN, 1989). A partícula se colide com a fibra e fica retida, como ilustrado na Figura 2.3. Assume-se então que a partícula tem movimento inercial e Browniano desprezível.

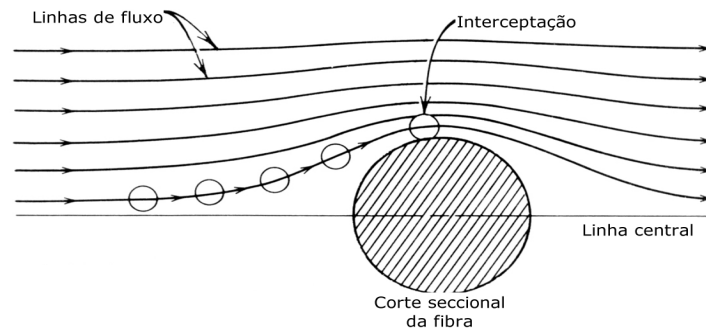


Figura 2.3. Coleta de partícula por interceptação direta

Rubow e Liu (1986) forneceram um parâmetro adimensional (R), que caracteriza a captura por interceptação, dado pela Equação (2.3):

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (2.3)$$

em que d_p é o diâmetro das partículas e d_f é o diâmetro das fibras.

Mecanismo Gravitacional

O mecanismo gravitacional é o resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, que causa um desvio na sua trajetória normal. É o mecanismo dominante para baixas velocidades de gás e grandes partículas. A eficiência depende da direção do fluxo, sendo maior quando o fluxo ocorre de cima para baixo. Esse mecanismo de coleta está ilustrado na Figura 2.4.

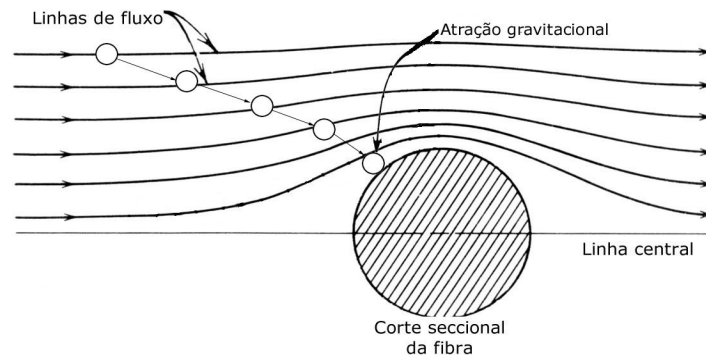


Figura 2.4. Coleta de partícula pelo mecanismo gravitacional

Deposição Eletrostática

Durante o processo de filtração pode haver presença de cargas eletrostáticas devido a choques e atritos entre partículas e meio filtrante, ou pode ser gerada pelo sistema. A eficiência de filtração é influenciada pela presença dessas forças eletrostáticas, aumentando-a e gerando tortas menos compactas (DUARTE FILHO, 1995).

Os principais mecanismos nos quais ocorre a coleta por deposição eletrostática são o coulômbico, em que há a atração entre partículas carregadas e o coletor carregado com carga oposta, e o dipolo-imagem, caracterizado pela atração entre a partícula carregada e o dipolo induzido no coletor globalmente neutro (AGUIAR, 1991). Estes mecanismos estão ilustrados na Figura 2.5.

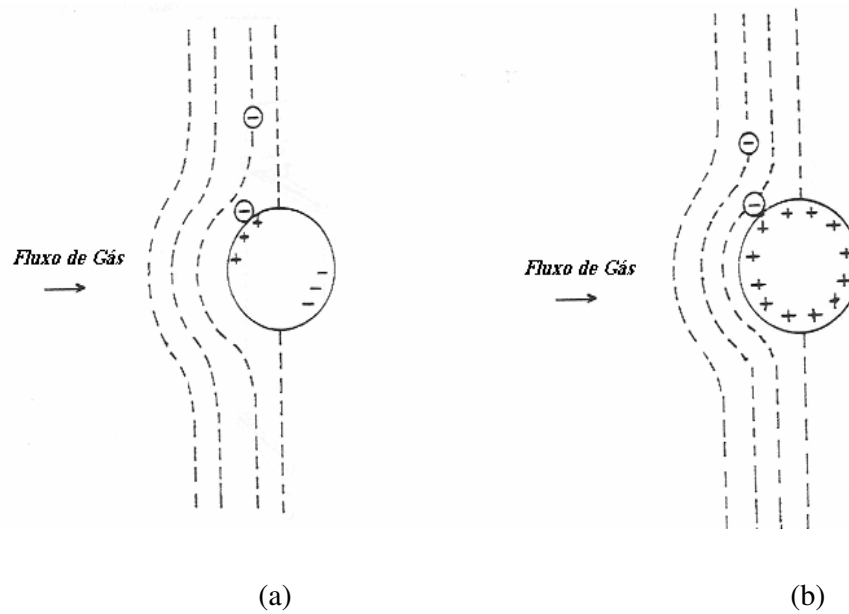


Figura 2.5. Coleta de partículas por deposição eletrostática: (a) dipolo imagem no coletor; (b) coulômbico

2.2 Formação de tortas

A filtração em um filtro novo e limpo ocorre em três fases distintas. Inicialmente a captura das partículas ocorre no interior do tecido, na superfície das fibras, com pequena variação da perda de carga e baixa eficiência. Essa fase é denominada de filtração interna. As partículas capturadas passam a agir como novos elementos coletores, formando filetes de partículas chamados dendritos, ilustrado na Figura 2.6, promovendo a eficiência do processo e resultando em uma maior taxa de aumento da perda de carga. Estes dendritos se desenvolvem e o resultado deste acúmulo de partículas é a formação de uma camada superficial de material particulado, conhecida como torta de filtração. Neste ponto a filtração torna-se essencialmente superficial e a perda de carga alcança sua máxima taxa de incremento, adquirindo comportamento linear em função da massa coletada, e a eficiência também é máxima (JAPUNTICH; STENHOUSE; LIU, 1994).

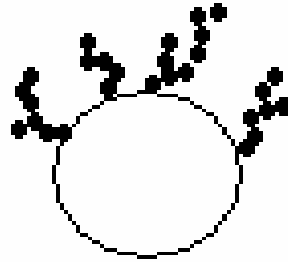
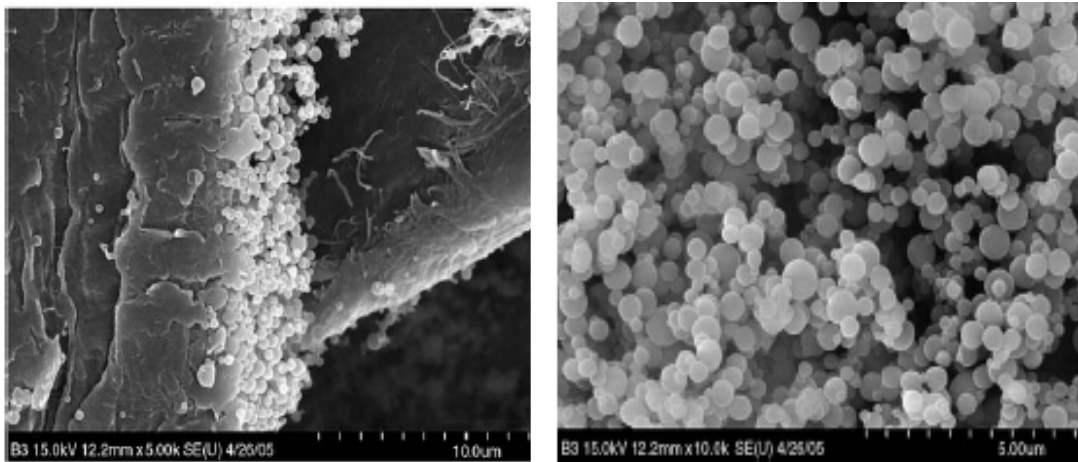


Figura 2.6. Esquema de formação de dendritos

A Figura 2.7 (a) e (b) representa fotografia da superposição dos dendritos sobre as fibras e da formação da torta na superfície do meio filtrante, respectivamente, obtidas em microscópio eletrônico de varredura.



(a)

(b)

Figura 2.7. (a) Formação de dendritos no interior do meio filtrante, (b) formação da torta de filtração na superfície do meio filtrante (SONG, 2006)

A Figura 2.7 (a) mostra como material particulado se sobrepõe sobre as fibras no interior do meio filtrante, formando os dendritos. Na Figura 2.7 (b) nota-se que a torta já foi formada, impossibilitando a visualização das fibras.

Como é difícil de definir experimentalmente o momento exato de formação de torta, vários autores admitem um valor experimental para demarcar o ponto em que a torta se forma, este ponto é conhecido como ponto de colmatação e pode ser entendido ainda, como a capacidade de retenção do meio (JAPUNTICH et al., 1994).

Walsh (1996) determina este ponto através do lugar geométrico obtido pelo gráfico de perda de carga em função da carga mássica, correspondente ao cruzamento da tangente da parte linear da curva, relativa à filtração superficial, com o eixo da abcissa, obtendo-se assim a massa de material particulado necessária para formar a torta. O esquema para a determinação do ponto de colmatação através desse método esta ilustrado na Figura 2.8.



Figura 2.8. Determinação do ponto de colmatação do meio

Segundo Walsh e Stenhouse (1997), Walsh et al. (1996) e Graef; Stenhouse e Walsh (1995), a colmatação ocorre mais rapidamente para partículas menores e para filtros mais densamente empacotados, já que há um menor espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas.

2.3 Perda de carga

A perda de carga descreve a resistência que o fluxo de gás encontra ao passar pelo filtro. A queda de pressão total de um sistema é determinada pela medida da diferença de pressão total em dois pontos do filtro, usualmente entrada e saída. É normalmente expressa em unidade de Pascal ou milímetros de coluna de água. (SEVILLE, 1997).

A perda de carga em um filtro aumenta durante o processo devido à coleta de partículas e formação da torta de filtração. A máxima perda de carga antes da limpeza ou troca do tecido pode ser estimada para determinar a potência de bombeamento requerida pelo soprador. Normalmente este é o fator limitante que determina quando a limpeza deve começar.

A faixa de operação, para perda de carga, da maioria dos filtros coletores está entre 5 e 25 centímetros de coluna de água, porque essa mostrou ser a melhor faixa para operação do ponto de vista econômico, já que quedas de pressões mais altas requerem equipamentos mais potentes e caros, com alto consumo de energia (CAVASSENO, 1980).

Geralmente, a operação de filtração de gases ocorre a baixas velocidades, sendo assim, o comportamento da queda de pressão em função da velocidade superficial do gás pode ser expresso pela Lei de Darcy, apresentada pela Equação (2.4).

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \cdot \mu_g \cdot V_F \quad (2.4)$$

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

Segundo Lucas (2000), para escoamento de fluidos newtonianos e incompressíveis através de meios porosos, o termo, $1/\alpha^* \mu_g$, denominado coeficiente de permeabilidade do meio filtrante (B), pode ser considerado constante. Rearranjando a Equação (2.4), obtém-se a Equação (2.5):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{V_F}{B} \quad (2.5)$$

em que L/B é denominado resistência específica total do filtro (k) e é diretamente proporcional a queda de pressão, se relacionando de forma linear entre esta e a velocidade de filtração, como apresentado na Equação (2.6).

$$\Delta P = k \cdot V_F \quad (2.6)$$

Em operações de filtração a equação que descreve a queda de pressão total é dividida em duas partes: a queda de pressão no meio filtrante, ΔP_m , e a queda de pressão devido à formação da torta, ΔP_c , e está descrita pela equação (2.7).

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

Como a espessura do meio filtrante permanece constante durante o processo, tem-se a Equação (2.8).

$$\Delta P_m = k_m \cdot V_F \quad (2.8)$$

Sendo que k_m é a resistência específica do meio filtrante.

Já no caso da queda de pressão devido à formação da torta, tem-se a espessura da torta, L_c , variando com o tempo de filtração. Porém, no caso de tortas incompressíveis, e conhecendo-se a densidade da partícula de pó e a porosidade da torta, pode-se chegar a esse valor pela massa de pó depositada por unidade de área (W), conforme Aguiar (1991), através da Equação (2.9):

$$W = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot L_c \quad (2.9)$$

Rearranjando a Equação (2.9), chega-se na Equação (2.10), que define a espessura da torta em função da densidade de partícula e da massa de pó depositada por unidade de área.

$$L_c = \frac{W}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.10)$$

Substituindo a Equação (2.10) na Equação (2.5) e considerando L como L_c , define-se a queda de pressão devido ao escoamento do gás através da torta, ΔP_c , pela Equação (2.11)

$$\Delta P_c = k_c \cdot V_F \cdot W \quad (2.11)$$

em que $k_c = 1/[\rho_p(1-\varepsilon).B]$ é a resistência específica da torta e é constante para um dado pó e porosidade (LEITH; ALLEN, 1986).

Então a queda de pressão total, ΔP_T , é dada pela Equação (2.12).

$$\Delta P_T = k_m \cdot V_F + k_c \cdot V_F \cdot W \quad (2.12)$$

2.4 Valor experimental da resistência específica da torta (k_c)

Devido a dificuldades de se obter k_c teórico, porque esse parâmetro é fortemente dependente da porosidade do meio, que, geralmente, é difícil de ser medida, a resistência, k , é determinada experimentalmente sendo chamada de k_c' , para distinguir do valor teórico.

O cálculo de k_c' é feito pelo aumento na queda de pressão, $(\Delta P_2 - \Delta P_1)$ no filtro com o ganho de massa $(M_2 - M_1)$ para o acúmulo de pó, como ilustrado na Equação (2.13) (AGUIAR, 1991).

$$k_c = \frac{A \cdot (\Delta P_2 - \Delta P_1)}{V_f \cdot (M_2 - M_1)} \quad (2.13)$$

Cheng e Tsai (1998) estudaram a influência do tipo de material particulado e da velocidade de filtração no valor da resistência específica e compactação de tortas de filtração (k_c) e concluíram que maiores velocidades de filtração resultaram em uma maior compactação e menor porosidade da torta, conseqüentemente maiores valores de resistência específica de tortas, k_c .

2.5 Permeabilidade do meio filtrante

Entende-se por permeabilidade a interação dinâmica entre o meio poroso e o fluido, sendo dependente de propriedades do meio poroso. Um fluido, quando é forçado a atravessar um meio poroso ocasiona a interação fluido-meio poroso, causando uma transformação na energia do sistema, geralmente associada à diminuição da pressão exercida pelo fluido (INNOCENTINI et al, 1999).

A permeabilidade do filtro é um parâmetro que deve ser considerado ao se escolher o meio filtrante. Filtros pouco permeáveis possuem baixa taxa de coleta de partículas, o que torna o processo economicamente menos vantajoso.

Em alguns casos filtros com baixo valor de permeabilidade são necessários como, por exemplo, quando a penetração de partículas pode causar danos para algum material ou ocasionar problemas no funcionamento de algum equipamento (INNOCENTINI et al, 1999).

Durante a operação de filtração a permeabilidade do tecido é reduzida pela deposição de material particulado residual, causando valores de permeabilidade

diferentes para o tecido novo e limpo. Usualmente, ao confeccionar um meio filtrante para ser usado em filtros manga, o objetivo é manter o seu valor de permeabilidade inicial, evitando a penetração do pó no meio filtrante (DAVIS, 1992).

A permeabilidade do filtro foi analisada em filtros cerâmicos por Kanaoka et al. (2001). Os resultados obtidos revelaram que o filtro que apresentou maior facilidade e eficiência de limpeza, com menor tempo de descolamento da camada de pó foi o de maior permeabilidade. Os autores também concluíram que o tempo de filtração é maior para filtros de maior permeabilidade.

Na literatura podem ser encontradas várias equações semi-empíricas para o cálculo desses coeficientes. Darcy, 1856, foi pioneiro na modelagem da permeabilidade em meios porosos e até hoje sua equação é uma das mais utilizadas, apresentada pela Equação (2.4) desse trabalho.

2.6 Porosidade do meio filtrante e diâmetro de poros

A porosidade é um importante parâmetro estrutural do meio filtrante. Esse parâmetro define a relação de espaços vazios, poros, do meio filtrante. Quanto mais poroso o filtro, maior será a vazão conseguida e mais longa a vida útil do tecido (SILVA NETO, 2002).

A porosidade do meio filtrante geralmente é dada pelo fabricante e também pode ser estimada por equações existentes na literatura, que descrevem a resistência de um meio poroso ao escoamento de um fluido, conhecido como método indireto, dentre elas está a clássica equação de Ergun (1952), ilustrada na Equação (2.14).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu_g \cdot V_F}{\varepsilon^3 \cdot d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\varepsilon) \cdot \rho_g \cdot V_F^2}{\varepsilon^3 \cdot d_p} \quad (2.14)$$

em que, ρ_g é a densidade do gás, μ_g é a viscosidade do gás, V_F é a velocidade superficial do fluido, d_p é o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes) e L é a espessura da camada porosa, o filtro, no caso.

A primeira parcela da equação (2.14) se refere aos termos viscosos e a segunda é relativa ao componente inercial. No caso de escoamentos puramente viscosos, como nos gases, a parcela inercial pode ser considerada desprezível em relação à viscosa e a Equação (2.14) pode ser reduzida para a Equação (2.15).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2 \cdot \mu_g \cdot V_F}{\varepsilon^3 \cdot d_p^2} \quad (2.15)$$

Segundo Japuntich et al. (1994), filtros de celulose com menores diâmetros de poro provocaram maiores perdas de carga e colmatação mais rápida do leite, diminuindo a penetração das partículas através do meio filtrante. No entanto, o coeficiente angular da reta correspondente à terceira fase de filtração, foi semelhante para os tecidos testados, o que indicou que o perfil da perda de carga desta fase independe da estrutura do tecido, para uma dada velocidade de filtração e diâmetro de partículas.

2.7 Porosidade da torta

Como visto anteriormente, depois que a torta é formada, esta passa a atuar como meio filtrante, sendo assim, a equação modificada de Ergun, Equação (2.15), pode ser utilizada como um método indireto para se estimar a porosidade da torta de filtração e L passa a ser a espessura da torta que pode ser obtida pelas Equações (2.16) e (2.17).

$$M = Q \cdot t = L \cdot A \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.16)$$

em que, M é a massa de torta, Q a vazão mássica de pó, A é a área superficial de torta, ρ_p a densidade das partículas e t o tempo de filtração. Rearranjando a equação (2.16), chega-se na Equação (2.17).

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

Substituindo L na Equação (2.15), obtém-se a Equação (2.18), utilizada para estimar a porosidade da torta de filtração.

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \mu_g \cdot Q \cdot V_F}{\varepsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot d_p^2} \quad (2.18)$$

Aguiar; Coury e Costa (1996) desenvolveram uma técnica experimental conhecida como Método Direto para determinar quantitativamente a porosidade de

tortas de filtração. Essa técnica consiste na 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.

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) e concluíram que maiores velocidades de filtração resultam em uma maior compactação da torta e conseqüentemente em menores valores de porosidades.

Negrini et. al. (2001) também estudaram a influência da velocidade de filtração na porosidade de tortas e verificaram que a porosidade média experimental diminuiu com o aumento da velocidade superficial de filtração.

Ito (2002) demonstrou que a velocidade de filtração interfere diretamente na porosidade da torta formada. O autor testou uma faixa de velocidades entre 5,0 e 15 cm/s, e verificou que os filtros submetidos a velocidades maiores de filtração apresentaram tortas menos porosas. Os experimentos de Silva e Aguiar (1999) ratificam estes resultados, para uma faixa de velocidade de 7,5 a 15,5 cm/s.

2.8 Velocidade de filtração

A velocidade de filtração é um parâmetro importante no processo de filtração de gases, porque está diretamente relacionada com o tempo necessário para filtração, desgaste do tecido, profundidade que o material particulado consegue penetrar no tecido e, juntamente com o método de limpeza, determina as dimensões do filtro. Além disso,

também exerce influência na queda de pressão residual, ΔP_R , queda de pressão após a limpeza do filtro, antes de se iniciar uma nova etapa de filtração.

Sendo assim, esse parâmetro é altamente influente no custo inicial do equipamento, e também no custo operacional. Recomendam-se, então velocidades de filtração na faixa de 0,5 a 6,2 cm/s (LEITH; ALLEN, 1986).

Altos valores de velocidade de filtração levam a um tempo de filtração reduzido, porém com alta penetração das partículas no tecido, o que dificulta a remoção da torta, ocasionando uma maior queda de pressão residual, ΔP_R , e também aumenta a queda de pressão durante a filtração, diminuindo a vida útil do tecido. Entretanto, uma alta velocidade de filtração requer menor área de filtração, diminuindo os custos iniciais.

Já para baixos valores de velocidade de filtração, tem-se um maior consumo de energia, porque o tempo de retenção das partículas é maior (DONOVAN, 1985). Porém a interação entre a partícula e o tecido é menor, facilitando a remoção da torta.

Silva et al. (1999), estudaram a influência da velocidade do gás na formação e destacamento da torta e seus resultados mostraram que houve uma tendência de diminuição na porosidade da torta e de aumento de sua resistência específica conforme se aumenta a velocidade de filtração. Seus dados também mostram que a força de adesão estimada aumenta, e a distância efetiva entre as partículas diminui, com o aumento da velocidade de filtração.

Thomas et al. (2001), também estudaram a influência da velocidade de filtração na penetração do tecido. Usaram valores de velocidade variando de 1 a 50 cm/s e comprovaram que o modo como as partículas se depositam no tecido não depende da velocidade de filtração.

2.9 Arraste efetivo

Considerando que para fluxos laminares a queda de pressão é proporcional à velocidade de filtração, o arraste efetivo (S), que é a razão entre a queda de pressão e a velocidade superficial do gás, é obtido dividindo ambos os lados da Equação (2.12) por V_f e está representado pela Equação (2.19).

$$\frac{\Delta P_T}{V_f} = S = k_m + k_c \cdot W \quad (2.19)$$

A Equação (2.19) é válida após a formação da torta, quando é verificado experimentalmente que o arraste é uma função linear em relação ao aumento de densidade de área. Antes da formação da torta, em qualquer estágio inicial da filtração, o arraste (S_E), pode ser calculado extrapolando a parte linear da curva até o ponto desejado, como ilustrado pela Figura 2.9.

Sendo assim, o arraste efetivo pode ser calculado como mostra a Equação (2.20), em que W_R é a massa residual de pó por unidade de área, determinado experimentalmente.

$$S = \frac{\Delta P_T}{V_f} = S_E + k_c \cdot (W - W_R) \quad (2.20)$$

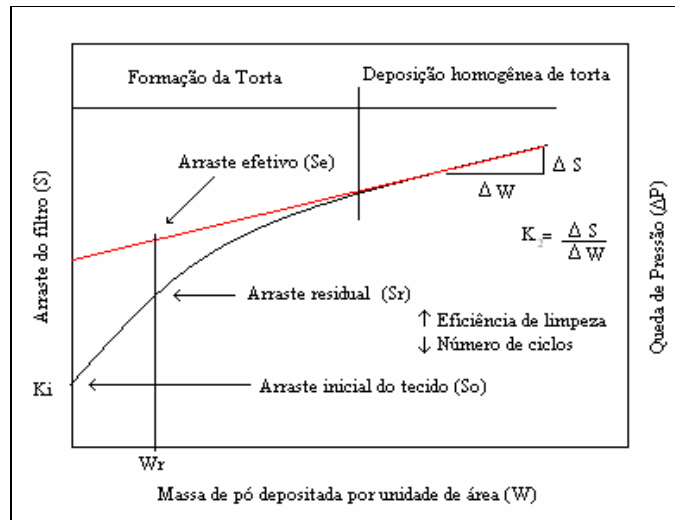


Figura 2.9. Determinação do arraste efetivo nos estágios iniciais da filtração
Modificado de Donovan, 1985

Para os ciclos consecutivos de operação de um filtro obtém-se uma série de curvas semelhantes, sendo o arraste cada vez mais pronunciado, dependendo da eficiência de limpeza (STRANGERT, 1977). Como a resistência efetiva da torta é dada pelo coeficiente angular da curva, a estrutura do tecido não exerce influência significativa no valor do arraste.

O arraste é a medida de resistência aerodinâmica do filtro preferida por modeladores, porque seu uso preserva o conceito da propriedade da camada do meio, independente da velocidade de escoamento (LEITH; ALLEN, 1986).

2.10 Ciclos de filtração

Nesse item serão apresentados comportamentos de ciclos de filtração ideais, reais e reais com regeneração incompleta, segundo a Comissão Alemã de Preservação do Ar (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003).

Comportamento ideal de ciclos de filtração

Conforme ilustrado na Figura 2.10, no comportamento de funcionamento descrito como “ideal” a perda de carga segue como função linear com o tempo durante um ciclo de filtração.

O comportamento ideal de ciclos de filtração considera uma compactação imperturbada de material particulado no filtro, com fluxos de volume e concentrações de pó constantes e limpezas uniformes do meio filtrante, levando a ciclos uniformes, com o mesmo tempo de filtração que o primeiro ciclo, quando o filtro está limpo e novo, fato que não é observado na prática. Neste caso, o aumento da perda de carga residual se deve a incorporação irreversível de partículas no interior do meio filtrante ou pela permanência de uma fina camada de pó, com espessura uniforme, após a regeneração do meio filtrante (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003).

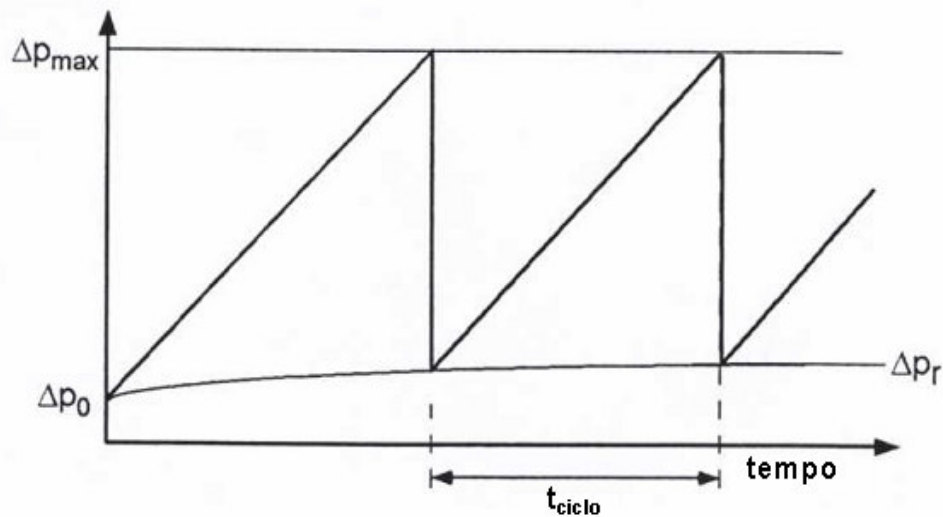


Figura 2.10. Ciclos ideais de filtração (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003)

Comportamento real de ciclos de filtração

O comportamento real dos ciclos de filtração pode ser visualizado na Figura 2.11. Nota-se que o tempo de filtração é reduzido em comparação a Figura 2.10 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 (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003).

Com a compressão da aglutinação no filtro a porosidade da torta de filtração é reduzida o que resulta numa resistência maior de fluxo e em conseqüência, durante fluxo de volume constante, há um aumento, muitas vezes repentino, da queda de pressão. Especialmente para altas perdas de carga máximas (maiores que 2.000 Pa) a compactação do pó é muito comprimida, e assim, dependendo das propriedades do pó, os tempos de ciclo são às vezes agravadamente diminuídos. Uma redução adicional dos tempos de ciclos é também neste caso motivado pela adição da perda de carga residual devido à incorporação e pó ou de regeneração incompleta.

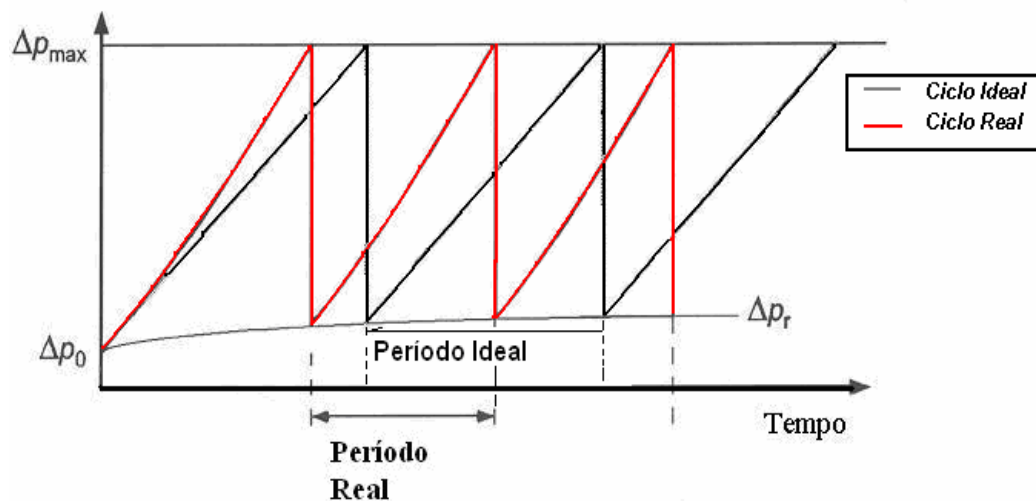


Figura 2.11. Ciclos Reais de Filtração (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003)

Comportamento de funcionamento real com regeneração incompleta

Quando a regeneração do filtro é incompleta, ou seja, quando o fenômeno de *patchy cleaning* ou remoção por blocos, ocorre, há formação de fendas no aglutinado no filtro e também resultam na redução do tempo do ciclo de filtração. Neste caso o decurso de curva é convexo, Figura 2.12.

Quando, depois do primeiro ciclo, ocorre a regeneração incompleta do meio filtrante, ou seja, parte da camada de pó permanece na superfície do filtro, a superfície de filtração efetiva é reduzida depois da regeneração. Em caso de fluxo de volume constante a velocidade de filtração aumenta nas áreas regeneradas do meio filtrante. Por causa dessa velocidade de filtração localmente aumentada a deposição da camada de pó no filtro forma-se principalmente nas áreas regeneradas do meio de filtro, gerando o comportamento convexo das curvas dos ciclos de filtração.

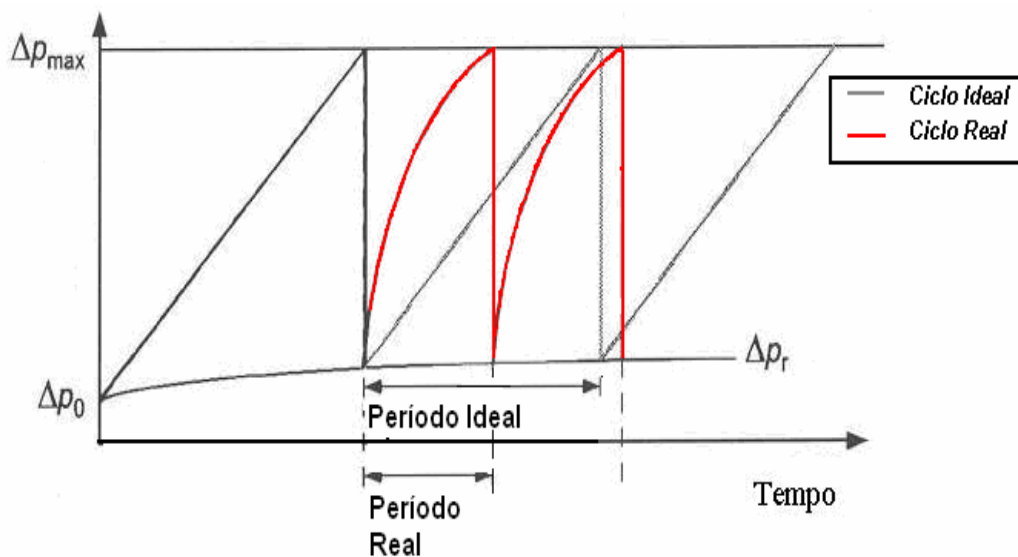


Figura 2.12. Ciclos de filtração reais, com comportamento de limpeza por blocos (*patchy cleaning*) (ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES, 2003).

2.11 Técnicas de limpeza dos filtros

Conforme mencionado anteriormente, quando a torta de filtração atinge uma dada espessura, determinada pela queda de pressão máxima, é necessário que esta seja destacada do meio filtrante por métodos de limpeza (STRAUSS, 1975).

Deve-se ter muita cautela no que diz respeito a limpeza do filtro, porque uma limpeza mal feita ocasiona um aumento na queda de pressão residual. E uma limpeza muito rigorosa pode danificar o tecido, reduzindo seu tempo de vida útil (LORA, 2002).

Existem vários métodos para a limpeza de filtros de tecidos. Os mais utilizados são vibração mecânica, fluxo de ar reverso e pulso de ar reverso, que encontram-se detalhados a seguir.

Vibração mecânica

O método da vibração mecânica é o modo de limpeza de filtro mais antigo e de menor custo, apropriado para sistemas de pequeno e médio porte. Uma das principais desvantagens dessa técnica é a necessidade de interromper a filtração por um intervalo de tempo de 2 a 5 minutos. Porém, pode-se utilizar um sistema com mais de um conjunto de mangas, para operá-los e limpá-los alternadamente. A Figura 2.13 ilustra um filtro em seu processo de filtração (a) e sendo limpo pela técnica de vibração mecânica (b).

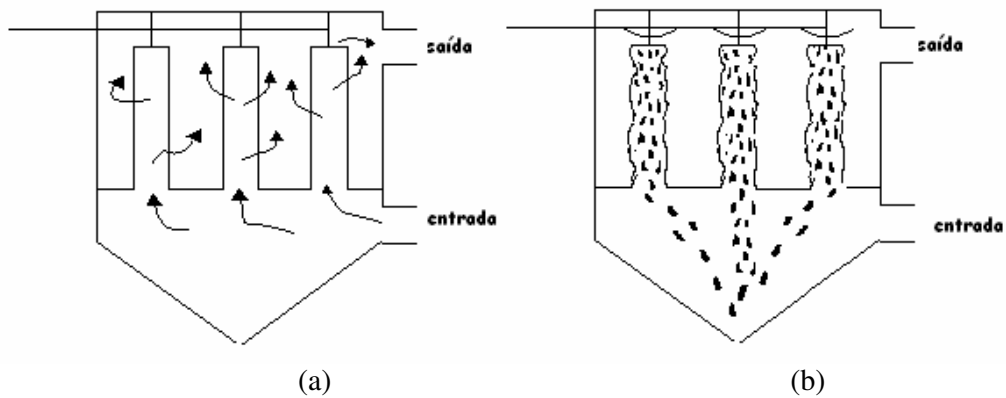


Figura 2.13. Limpeza por Vibração Mecânica. (a)filtração e (b) limpeza

Essa técnica constitui na vibração do tecido por um motor excêntrico. Essa vibração promove a limpeza do filtro através de sua aceleração, que é função da amplitude e da frequência da vibração. A energia repassada para o tecido é capaz de romper as ligações adesivas entre o meio filtrante e a torta, ou as ligações coesivas dentro da estrutura do tecido (MOREIRA, 1998).

Fluxo de ar reverso

Essa técnica de limpeza constitui na passagem de ar limpo no sentido contrário ao fluxo de ar no processo de filtração. Normalmente, se estipula um tempo de limpeza para que uma quantidade significativa de pó seja removida. Sendo assim, também é necessária a interrupção do processo de filtração. Porém esse mecanismo possui a vantagem de desgastar menos o tecido, aumentando seu tempo de vida útil, já que este não é exposto a um movimento violento.

A Figura 2.14 ilustra esquematicamente esse mecanismo de limpeza.

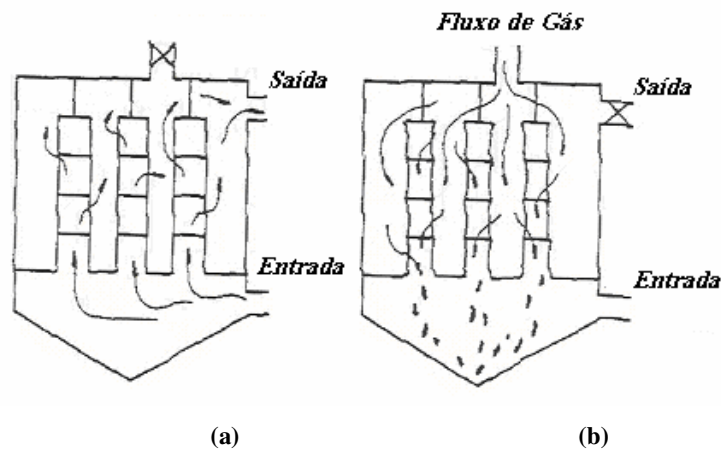


Figura 2.14. Limpeza por fluxo de ar reverso (a) filtração e (b) limpeza

Pulso de ar reverso

Esse mecanismo de limpeza é semelhante ao de limpeza por fluxo de ar reverso. É a técnica mais recente e está sendo muito utilizada. Neste método a torta é periodicamente submetida a pulsos de ar comprimido, através do tecido, causando uma repentina expansão das mangas, causando a ruptura da torta, expulsando o pó do meio filtrante (MCKENNA; FURLONG, 1992).

A limpeza do tecido por essa técnica dura frações de segundos e é bastante efetiva, não sendo necessária a interrupção do processo de filtração. No entanto, o seu vigor pode danificar o tecido, diminuindo sua vida útil e até sua eficiência de coleta na filtração.

A Figura 2.15 ilustra esquematicamente o funcionamento desse processo de limpeza.

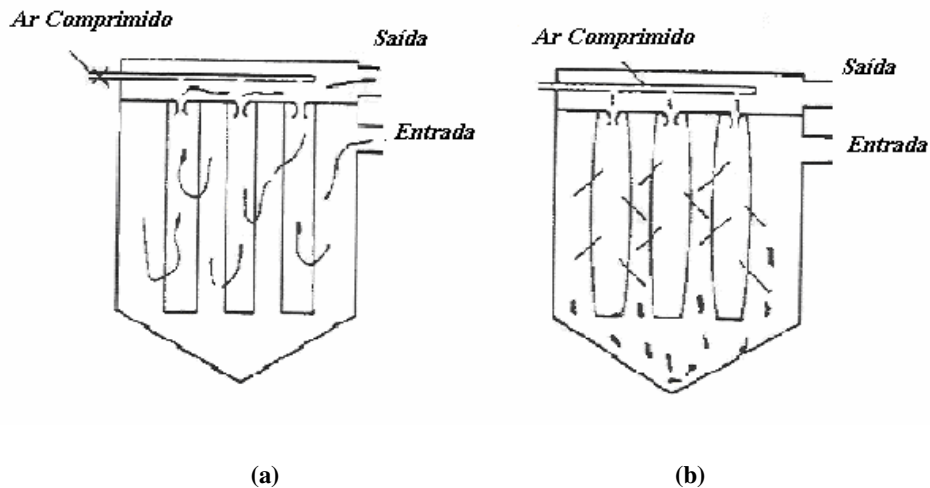


Figura 2.15. Limpeza por pulso de ar reverso (a) filtração e (b) limpeza

2.12 Remoção por Blocos

A remoção da torta de filtração ocorre quando a força de desaglomeração exercida sobre a camada de partículas é maior que a força de adesão que liga as partículas ao meio filtrante (CALLÉ et al., 2001)

Após a limpeza do filtro ser realizada, era de se esperar que o tecido voltasse a ter suas propriedades iniciais, porém não é isso o que acontece na prática. A remoção completa da torta não é atingida, na maioria das vezes é observado um fenômeno conhecido como *patchy cleaning*, ou remoção por blocos, no qual há remoção completa de alguns pedaços de torta, exceto por uma fina camada de pó, e outras partes da torta permanecem intactas. A Figura 2.16 ilustra o fenômeno de *patchy cleaning*.

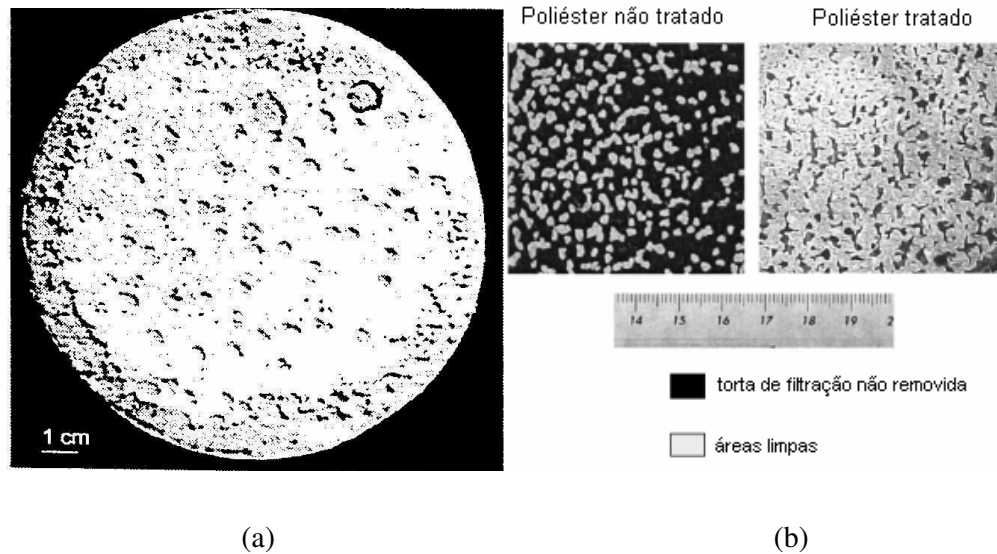


Figura 2.16. Ilustração do patchy cleaning. (a) Vista superior de um filtro rígido, mostrando em detalhes o “patchy cleaning” (DITTLER; KASPER, 1999) e (b) Filtro de poliéster com e sem superfície de tratamento (CALLÉ et al., 2002b)

Uma das explicações, sugerida por Koch (1996), para que esse fenômeno ocorra é que geralmente, a torta formada e o meio filtrante não são uniformes, e possuem propriedades que variam nas direções paralela e perpendicular ao filtro, então podem existir regiões mais fracas, ou seja, irregularidades na força de adesão entre as partículas e o meio filtrante, gerando áreas preferenciais de limpeza, onde as rachaduras se iniciam e se propagam.

A força de coesão também tem um papel importante na limpeza da torta. Quanto maior a força de coesão, maior o tamanho dos fragmentos de torta destacados. (CALLÉ et al., 2001)

Na prática, ainda pouco é conhecido sobre o porquê das tortas mostrarem o comportamento de remoção por blocos (*patchy cleaning*) sob condições moderadas de limpeza.

Após a limpeza da torta, pode ser observada uma perda de carga residual. O valor da perda de carga residual aumenta com o número de ciclos e tende a um valor limite. Este período é denominado período de condicionamento e pode durar dezenas ou centenas de ciclos. Em alguns casos extremos a saturação do tecido não é atingida, o equilíbrio não é estabelecido, e a queda de pressão residual não se torna constante.

Callé et al. (2002 a) afirmam que a perda de carga residual está relacionada ao fato de algumas partículas coletadas pelo meio que não conseguiram ser removidas. Segundo Stocklmayer e Hollinger (1998), a queda de pressão residual está ligada a compressão da camada de partículas coletadas pelo meio filtrante.

Durante algum tempo a perda de carga residual era tida como parâmetro de indicativo de grau de limpeza do filtro. Porém, de acordo Duo et al. (1997 a e b) o aumento na camada residual de pó não explica o aumento na perda de carga residual.

Atualmente a fração de limpeza, f , tem sido o parâmetro mais utilizado para caracterizar a eficiência de regeneração. A fração de limpeza é definida como a razão da área limpa pela área total de filtração. Segundo Ellenbecker e Leith (1981), para filtros de tecido não trançado, a fração de limpeza decresce com o número de ciclos segundo a lei das potências, e é proporcional ao quadrado da velocidade de limpeza. Porém essa proporção não foi obtida no trabalho de Tieni (2005).

A eficiência de regeneração, ou fração de limpeza, também pode ser dada em termos mássicos. Nesse caso, a eficiência é tida pela razão entre a massa removida durante a limpeza e a massa coletada na filtração (DITTLER; KASPER, 1999).

No caso de limpeza da torta feita através da técnica de fluxo reverso, Tieni (2005) comprovou que a regeneração do tecido está relacionada com a velocidade de limpeza, sendo que a massa de torta removida aumentou conforme se aumentou a

velocidade de limpeza, apresentando um comportamento linear com a perda de carga máxima. Porém, os valores de eficiência de limpeza para velocidades de limpeza de 16 cm/s foram muito próximos dos valores obtidos para 13cm/s e, para tortas espessas, o aumento da velocidade de limpeza de 13 para 16 cm/s não melhorou a eficiência de limpeza. Observando a existência de um valor limite de velocidade de limpeza dependendo da espessura da torta.

Tieni (2005), também constatou que a área removida se tornou constante a partir de um certo valor de velocidade de limpeza, no caso, 13 cm/s. E que a porcentagem de pedaços relativamente pequenos, com diâmetros menores que $0,1 \text{ cm}^2$ aumentou com o aumento da velocidade de limpeza, exceto para 16cm/s.

2.13 Tecidos utilizados em filtros manga

Atualmente, há uma grande variedade de fibras, naturais ou sintáticas, usadas para confecção de tecidos para filtro manga. A escolha do meio filtrante a ser utilizado depende das características do gás, como: temperatura, umidade, alcalinidade e acidez, do material particulado, como diâmetro de partícula, concentração, abrasividade, e, também, do custo e da disponibilidade do filtro no mercado.

O conceito de abrasividade é definido pela erosão das fibras do tecido ou do material da superfície da fibra, que resulta do contato entre a fibra e as partículas de pó, ou entre as fibras adjacentes.

Os primeiros filtros utilizados eram de fibras naturais, principalmente lã e algodão. Embora essas fibras possuam alguma limitação em suas propriedades físicas, elas ainda são empregadas em muitas aplicações de filtração (DONOVAN, 1985).

Entretanto, com a crescente preocupação com a poluição e qualidade do ar, principalmente nas últimas cinco décadas, foram desenvolvidas novas fibras sintéticas, e hoje a filtração abrange uma faixa de aplicação mais ampla.

Atualmente, as fibras sintéticas estão sendo mais utilizadas que as fibras naturais. As vantagens desse tipo de fibra são menores custos, maior resistência química e mecânica e menor diâmetro das fibras. Entre as fibras sintéticas mais utilizadas podem-se citar as formadas por acetatos, acrílicos, poliamidas, poliésteres, polipropileno, entre outros. No caso de fluxo gasoso de alta temperatura o tecido mais utilizado é o formado por fibras de vidro, podendo-se também utilizar tecidos formados por Teflon e Ryton. (MARTINS, 2001).

A Tabela 2.1 ilustra as principais propriedades de algumas fibras.

Para que haja um bom desempenho no processo da filtração é necessário que o filtro seja compatível com o material particulado a ser coletado e também um projeto adequado para a geometria do sistema coletor de pó e requisitos de limpeza, ressaltando a importância de todos os parâmetros do tecido.

Tabela 2.1. Propriedades das fibras. (Fonte: DONOVAN, 1985)

Fibra	Resistência ácida	Resistência alcalina	Resistência ao calor		Resistência à abrasão
			Max °C	Pico °C	
Algodão	Destruída por ácidos concentrados ou diluídos	Resistente, mas incha ao menos sendo submetido a tratamento	100	120	Moderada à boa
Nylon	Reage com ácidos minerais de todas as concentrações	Boa resistência até mesmo para álcalis concentrados fervendo	100	120	Excelente
Poliéster	Boa resistência para 30% HCl 50% H ₂ SO ₄ à 50°C	Resistência moderada mas risco de hidrólise	150	180	Excelente
Acrílico (Dupont)	Boa resistência para 30% HCl 50% H ₂ SO ₄ à 50°C	Resistência moderada até mesmo à altas temperaturas	130	160	Moderada à boa
Acrílico (Bayer)	Resistente para HCl concentrado e 50% H ₂ SO ₄	Boa resistência: por exemplo— resistente à 25% KOH	140	170	Moderada à boa
Polipropileno	Não afetado para ácidos concentrados exceto agentes oxidantes	Não afetado por álcalis concentrados, exceto agentes oxidantes	100	120	Boa
Teflon	Resistente à ácidos diluídos até mesmo à altas temperaturas	Resistente	230	280	Razoável
Vidro	Resistente à todos exceto HF e H ₃ PO ₄ quente	Atacado por álcalis fortes	285	315	Fraco

Outra característica do tecido que deve ser considerada é a sua capacidade de liberar, na limpeza, o pó coletado na filtração. Essa capacidade não depende apenas do método e da intensidade da limpeza, mas também do caráter adesivo do tecido. Sabe-se que a flexibilidade do tecido pode facilitar a limpeza, porém também facilita na degradação do tecido, diminuindo sua vida útil.

A capacidade de desprendimento do pó depende do modo como o tecido é confeccionado. Ainda não há muitas informações sobre esse assunto. Sabe-se apenas que uma superfície de tecido lisa libera o pó com maior facilidade que uma superfície felpuda. Isto porque o pó pode aglomerar em fibras soltas e, durante a limpeza, soltar-se da superfície dessas fibras e retornar ao fluxo de gás, passando novamente pela filtração, conseqüentemente, tem-se uma limpeza pouco efetiva.

Existem alguns tratamentos no acabamento dos tecidos capazes de aumentar a eficiência de limpeza. Os estudos de CALLÉ et al (2002a), comprovaram que o desprendimento de torta de pó em filtros de poliéster com superfície tratada foi bem maior que no caso do filtro não tratado.

Um tratamento eficiente para melhorar o desprendimento da torta da superfície do meio filtrante é o aquecimento do tecido, correspondente a máxima temperatura admitida pelo tecido em condições de operação, até que ocorra o derretimento e a fusão das fibras. Entretanto, esse tratamento aumenta a resistência ao escoamento no tecido.

Alguns outros tratamentos, térmicos, físicos e químicos foram desenvolvidos para melhorar a estabilidade mecânica dos tecidos tanto naturais como sintéticos. Tratamentos com silicone são feitos para facilitar a liberação da torta. Já os tecidos naturais (lã e algodão) normalmente são pré-lavados para evitar seu encolhimento durante a operação. Outros processos são descritos a seguir.

Calandragem (“Calendering”) é o processo no qual as fibras do tecido são pressionadas através de rolos para aplainar ou alisar o material. O objetivo é dar uma superfície mais uniforme para o tecido.

“Napping” é um processo que promove a raspagem da superfície do filtro causando um aumento na superfície das fibras aumentando a área de coleta de partículas.

Chamuscagem (“Singeing”): este tipo de processo usa uma chama para queimar e eliminar as fibras salientes do tecido.

“Glazing”: é o processo de submeter às fibras a altas pressões e temperaturas elevadas. As fibras fundidas são envolvidas em resina natural ou sintética. Este tratamento melhora a resistência mecânica do material

Os tecidos podem ser confeccionados de maneira trançada ou não trançada.

Tecidos trançados

A maior parte dos tecidos utilizados na filtração de gases é confeccionada completamente ou parcialmente por trançamento das fibras. O filtro manga no qual o gás flui de dentro das mangas para fora usam tecidos trançados quase que exclusivamente (MYCOCK; MCKENNA; THEODORE, 1995). Exemplos seriam filtros manga com sistema de limpeza por ar reverso e vibração mecânica. Os filtros de tecido trançado oferecem baixa resistência ao fluxo de gás e seu acabamento macio confere boa característica de liberação.

Esses tecidos são produzidos por entrelaçamento das fibras que o compõe. Durante o entrelaçamento, fios longitudinais são entrelaçados em ângulo reto com fios transversos por meio de um tear. Existem muitos modelos de entrelaçamento, porém, os

mais utilizados são a sarja, o cetim, ou tramas lisas (DAVIS, 1992). Estes tipos de entrelaçamento podem ser visualizados na Figura 2.17

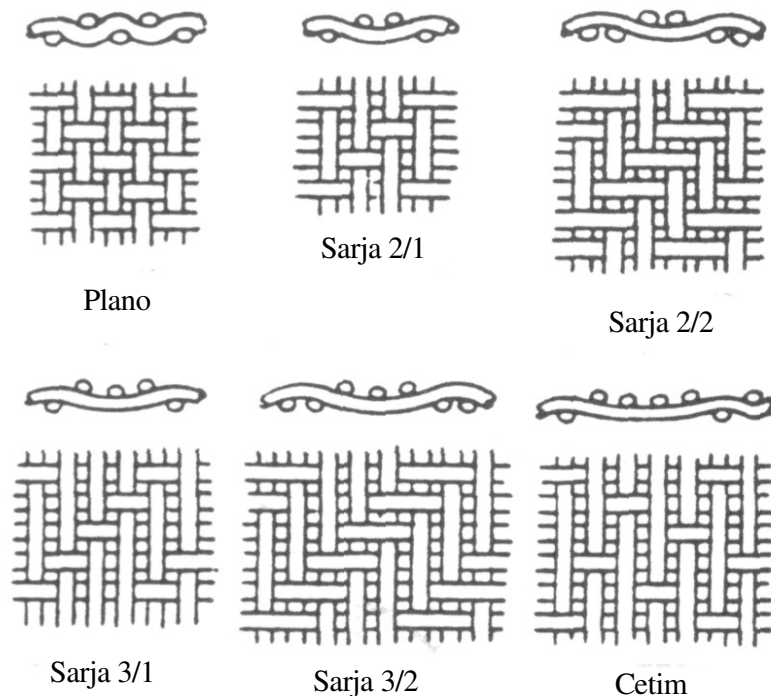


Figura 2.17. Tipos de tecidos trançados (DAVIS, 1992)

Tecidos não trançados

Existem também os tecidos não trançados, ou feltros, os quais são feitos diretamente a partir de uma trama de fibras sem a preparação do fio requerida no entrelaçamento. Os tecidos não trançados ou feltros são mais apropriados para filtros manga com sistema de limpeza por jato pulsante que oferece alta energia para limpeza e alto fluxo operacional de gás. Filtros não trançados trabalham bem com pó mais pesado como areia seca, pedra calcária, e grãos. Em geral os tecidos não trançados possuem vida útil mais longa das mangas, mas oferecem grande resistência ao fluxo do que os tecidos trançados (MYCOCK; MCKENNA; THEODORE, 1995).

Segundo a associação International Non-woven and Disposables Association (INDA), um tecido não trançado é feito diretamente a partir de uma trama de fibras sem a preparação do fio requerida por entrelaçamento. As fibras podem ser orientadas numa direção ou depositadas ao acaso. A integridade estrutural dessa trama é dada por: 1) entrelaçamento mecânico das fibras, 2) união induzida térmica ou quimicamente, ou 3) aplicação de alguns adesivos ou resinas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo são qualificados os materiais, os equipamentos utilizados e a metodologia empregada na aquisição de dados e na realização dos ciclos de filtração.

3.1 Materiais

3.1.1 Material particulado

Como material particulado foi utilizado concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), fornecido pela FOSFERTIL S. A .

A densidade do sólido foi obtida por picnometria a Hélio, utilizando o equipamento ACCUPYC 1330, da Micromeritics. O valor da massa específica obtida foi de $2,79 \text{ g/cm}^3$.

O diâmetro médio volumétrico das partículas foi determinado utilizando o equipamento MALVERN MASTERSIZER e o valor obtido foi $4,5 \mu\text{m}$. A distribuição granulométrica encontra-se na Figura 3.1.

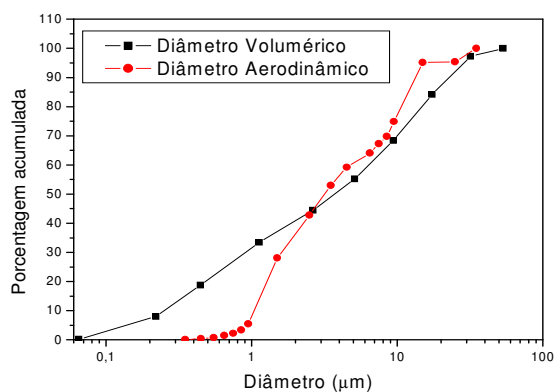


Figura 3.1. Distribuição granulométrica do diâmetro médio volumétrico e do diâmetro aerodinâmico

O diâmetro aerodinâmico da rocha fosfática foi determinado através do equipamento Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320, da TSI. O valor médio foi igual a 4,13 μm . O diâmetro de Stokes foi determinado no equipamento CAPA 700 - Particle Sizer Distribution Analyser - HORIBA (DEMA-UFSCar), o valor obtido foi 3,71 μm

3.1.2 Meios filtrantes

Foram utilizados três meios filtrante com o intuito de avaliar a influência da estrutura do tecido no processo de filtração e de regeneração do meio filtrante. Esses tecidos foram: o poliéster, o polipropileno e o acrílico, todos foram fornecidos pela empresa fabricante GINNO CACCIARI.

Os tecidos foram submetidos a tratamentos de calandragem e de chamuscagem em uma de suas faces.

Para observar a superfície dos tecidos, foram realizadas microfotografias das amostras dos mesmos. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 3.2. Através destas microfotografias, pode-se verificar que o polipropileno apresenta uma estrutura superficial mais fechada que os demais.

As características dos meios filtrantes empregados, como contextura, gramatura e espessura foram fornecidas pelo fabricante e encontram-se especificadas na Tabela 3.1.

Com a finalidade de se obter uma melhor avaliação dos resultados foi utilizada também a caracterização dos meios filtrantes feita por Rodrigues (2004b). Essas características podem ser encontradas na Tabela 3.2.

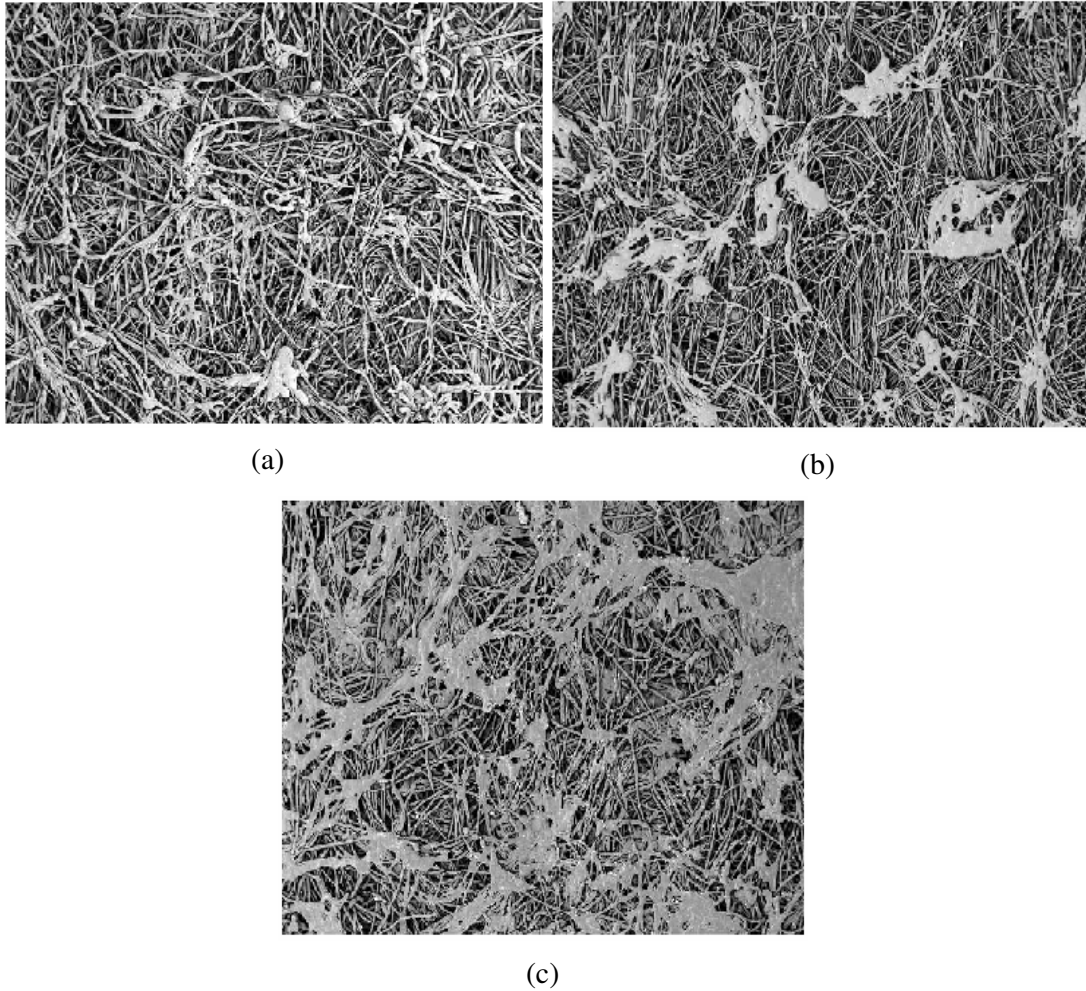


Figura.3.2. Microscopia eletrônica de varredura dos tecidos testados. Aumento de 50X: (a) Acrílico; (b) Poliéster e (c) Polipropileno.

Tabela 3.2 - Descrição dos meio filtrantes empregados (dados do fornecedor)

Meio filtrante	Especificação	Contextura	Gramatura (g/m ²)	Espessura (mm)
Polipropileno 100%	3008PP	Feltro Agulhado	600	2,5 – 2,8
Poliéster 100%	1016P	Feltro Agulhado	550	1,9
Acrílico 100%	7002AC	Feltro Agulhado	550	2,5

Caracterização dos meios filtrantes

Tabela 3.2 - Caracterização dos meios filtrantes

Meio Filtrante	Acrílico	Poliéster	Polipropileno
Gramatura (g/cm²)	550	550	600
* Porosidade Superficial	0,77	0,81	0,72
* Permeabilidade ao ar (m²)	5,9 10⁻⁸	5,5 10⁻⁸	2,2 10⁻⁸

* Obtidas por micrografia e análise de imagens (RODRIGUES, 2004b.)

3.2 Equipamento de filtração

O equipamento utilizado para realização dos ciclos de filtração e limpeza era constituído por uma caixa de filtração, onde ficava o meio filtrante (tecido), e por equipamentos periféricos, como o gerador de pó e o soprador. O sistema experimental se encontra ilustrado na Figura 3.3

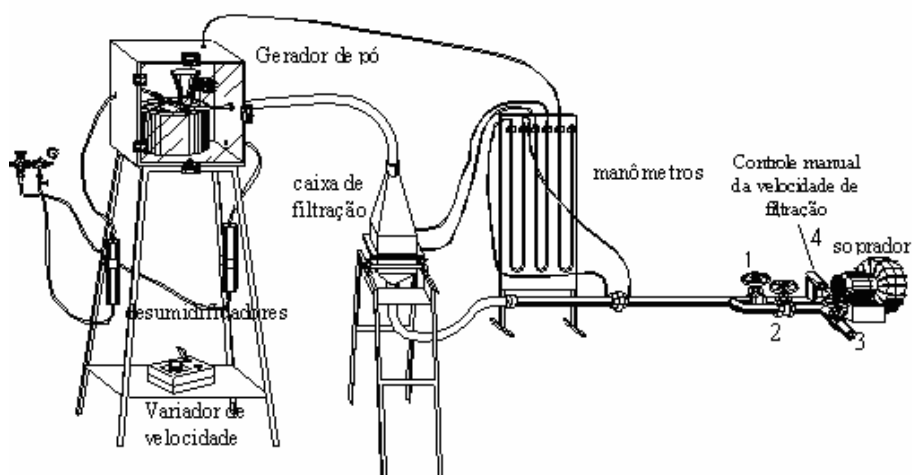


Figura 3.3. Equipamento de Filtração

3.2.1 Sistema de alimentação de pó

O sistema de alimentação do aerosol era constituído por um prato giratório, feito de aço inoxidável com 24 cm de diâmetro, motor, cone de alimentação, vibrador e

nivelador de pó. O sistema continha ainda um aspirador, um soprador e uma coluna de sílica gel, utilizada para desumidificação do ar.

O pó era depositado, através do cone de alimentação, em sulco semicircular do prato rotativo. O motor impulsionava o prato rotativo a girar, tornando assim possível variar a taxa de alimentação. A função do vibrador, localizado sob o cone de alimentação de pó, era evitar o empacotamento do pó a ser disperso. O nivelador mantinha o pó alimentado pelo cone no interior do sulco. O sistema de alimentação está representado na Figura 3.4.

Um aspirador do tipo Venturi succionava o pó contido no sulco semicircular por meio da passagem a alta velocidade do ar comprimido e injetava-o na linha de corrente gerada pelo soprador.

Acoplado a este gerador foi instalada uma coluna de sílica gel, na qual o ar comprimido passava por uma prévia secagem antes do contato deste com o pó, evitando que possíveis gotas de óleo e água aglomerassem o material particulado.

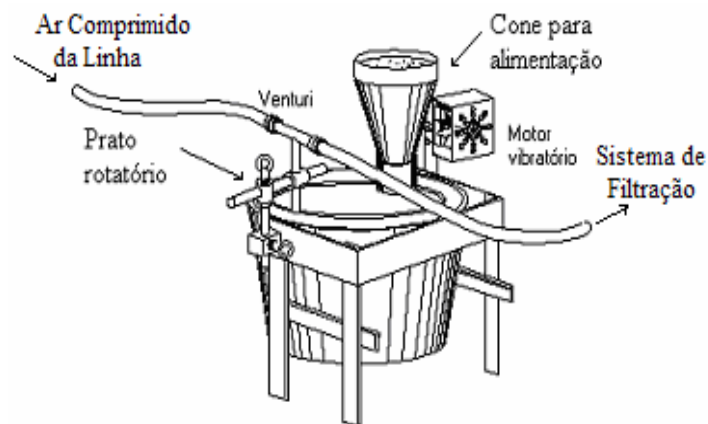


Figura 3.4. Sistema de alimentação de pó

3.2.2 Caixa de filtração

O filtro, possuía uma área de filtração de 225 cm^2 , era esticado e parafusado entre duas molduras colocadas no interior da caixa de filtração. A caixa de filtração, feita de aço, é formada por duas tampas unidas por uma dobradiça, entre elas se situava o filtro. Para manter o filtro fixo dentro da caixa, as tampas eram fechadas com garras. A vedação do sistema foi garantida através de um revestimento de borracha nas tampas, evitando o vazamento de gás e aerossóis.

A caixa de filtração era conectada, em suas extremidades, por mangueiras de 2" de diâmetro. Em uma extremidades encontrava-se o gerador de pó e na outra o soprador. Essa caixa, apresentada na Figura 3.5 podia ser posicionada tanto na vertical, no processo de filtração, como na horizontal, durante a limpeza do filtro. Isso foi possível porque a caixa se encontrava sobre um suporte articulado.



(a)

(b)

Figura 3.5. Caixa de filtração: (a) fechada e (b) aberta

3.2.3 Medidores de vazão e queda de pressão

Um manômetro diferencial do tipo U, com água como fluido manométrico, foi utilizado para medir a queda de pressão total no filtro durante a filtração. As tomadas de pressão eram feitas na entrada e na saída do filtro, como mostra a Figura 3.5.

Uma placa de orifício conectada a um manômetro tipo tubo U, com água como fluido manométrico, foi usada para medir a vazão de gás. Esse medidor se encontrava localizado na linha, entre a saída da caixa de filtração e o soprador, vide Figura 3.3.

3.2.4 Direcionamento do fluxo

Um soprador IBRAM com 4 Hp de potência, foi responsável pela sucção do gás, durante a filtração, e por soprá-lo no processo de limpeza do filtro. O direcionamento do escoamento foi feito através 4 válvulas tipo gaveta, também responsáveis pelo controle da vazão.

Para garantir a sucção do gás, no processo de filtração, mantinha-se as válvulas 1 e 3 totalmente abertas e a válvula 4 totalmente fechada. A válvula 2 era uma válvula controlada manualmente, usada para ajustar e manter constante a velocidade superficial do ar, verificada através da queda de pressão no manômetro em U, ligada a placa de orifício.

No processo de limpeza, o direcionamento do fluxo gasoso era invertido. Isso foi possível fechando totalmente a válvula 1 e abrindo lentamente a válvula 2, até que o gás atingisse a velocidade superficial de limpeza desejada. A válvula 3 permanecia parcialmente aberta e a válvula controladora de ar totalmente aberta.

3.2.5 Controle da umidade

Para manter a umidade na faixa desejada durante a operação de filtração, foram colocadas colunas de desumidificação de sílica gel na parte externa do equipamento, possibilitando a passagem de ar praticamente seco. O controle da umidade foi feito de forma a mantê-la na faixa entre 8 e 20%, evitando a aglomeração do material particulado sobre a superfície da manga, diminuindo a passagem de ar, devido ao aumento da resistência da torta.

3.3 Ensaios

3.3.1 Filtração

Para realizar os ensaios de filtração, primeiramente o material particulado era disperso no ar de modo a gerar uma corrente gasosa suja, que passava pelo filtro, onde o material particulado ficava retido, formando a torta e limpando o ar.

Inicialmente o prato de alimentação foi calibrado de modo que um giro fosse realizado a cada 2 minutos, garantindo a mesma alimentação de pó em todos os ensaios realizados.

Em seguida, o pó, mantido em uma estufa para que permanecesse seco, era depositado no reservatório contido dentro da caixa de alimentação. Esta, então, era fechada e o ar comprimido era ligado para alimentar o interior da caixa e o gerador de pó com ar seco. O ar comprimido antes de entrar na caixa de filtração passava por dois desumidificadores, quem continham sílica gel. A umidade relativa permanecia abaixo de 15%.

O filtro, após sua pesagem, era colocado quadro, e preso na caixa de filtração através de garras metálicas.

Após todo esse procedimento, quando a umidade relativa se estabilizava em valores abaixo de 15%, o soprador e a rotação do prato de alimentação eram ligados e a velocidade de filtração estabelecida era ajustada.

O soprador sugava o ar sujo contido na caixa de alimentação. A corrente gasosa suja passava pela caixa de filtração, com vazão constante, através do filtro, que se encontrava na posição horizontal, perpendicular ao escoamento do gás. e as partículas eram coletadas formando a torta de filtração. A vazão de ar era medida através de uma placa de orifício calibrada conectada a um manômetro tipo U e o controle era feito manualmente por uma válvula controladora de fluxo, mantendo a velocidade de filtração constante.

Durante a realização dos ensaios de filtração, eram realizadas medidas dos valores de queda de pressão no filtro de 30 em 30 segundos, até que a perda de carga máxima pré-estabelecida fosse atingida.

A próxima etapa era desligar o soprador, o prato rotatório e o ar comprimido. Em seguida a caixa de filtração era aberta cuidadosamente e o filtro, com a torta formada, era pesado.

3.3.2 Remoção da torta

Para remover a torta foi utilizada a técnica de limpeza por fluxo de ar reverso, ou seja, o ar limpo percolava o filtro no sentido contrário ao da filtração.

Após a pesagem da torta de filtração, uma folha de papel sulfite de massa conhecida e era posicionada abaixo da caixa de filtração para coletar as partículas que desprendiam da torta durante o processo de limpeza do meio filtrante. O filtro era então, cautelosamente colocada na posição horizontal.

As válvulas eram ajustadas de modo a inverter o fluxo de ar. O compressor era ligado e a válvula que permitia o controle de fluxo era aberta lentamente, evitando assim pulso de ar, até que a velocidade de limpeza desejada fosse atingida. A limpeza tinha um tempo de duração de dois minutos, quando 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.

As tortas foram fotografadas com uma câmara digital, SONY P92, após a etapa de limpeza para posterior análise através de um programa analisador de imagens, o IMAGE-PRO PLUS, segundo a técnica desenvolvida por Tieni (2005). Tornando possível de se obter a área regenerada do filtro.

A Figura 3.6. (a) ilustração do meio filtrante com a torta de filtração e a Figura 3.6. (b) o meio filtrante após a limpeza, onde pode ser observado o fenômeno de remoção por blocos.

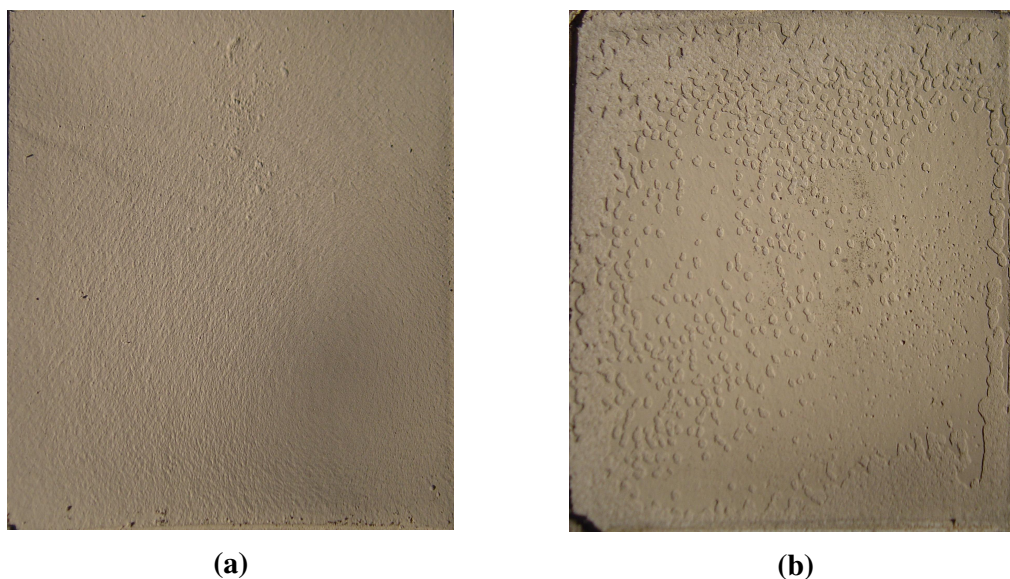


Figura 3.6. (a) Filtro com a torta de filtração após o primeiro ciclo de filtração e (b) filtro parcialmente limpo

3.3.3 Análise das imagens

As fotografias das tortas após a limpeza eram analisadas utilizando o software IMAGE PRO PLUS. Como não houve contraste entre as áreas de tortas removidas e as áreas de tortas remanescentes, para tornar a análise possível, a marcação da área, onde as tortas foram destacadas, era realizada manualmente pelo usuário, conforme ilustrado pela Figura 3.7.

Essas análises tinham como objetivo fornecer a área limpa do tecido e também o tamanho médio dos pedaços de torta removidos.

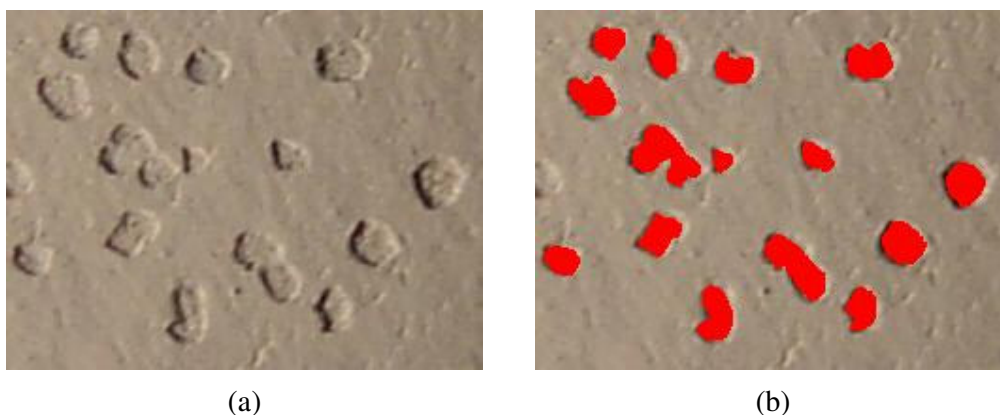


Figura 3.7. (a) Pedacos de torta destacados na limpeza e (b) áreas marcadas, através do Programa de análise de Imagens, dos pedacos de torta destacados na limpeza.

3.4 Planejamento experimental

Com o objetivo de estudar a formação de tortas e o fenômeno da remoção por blocos, avaliando a influência da velocidade de filtração, velocidade de limpeza, espessura da torta e tipo de tecido, na regeneração do tecido foram realizados ensaios de 10 ciclos filtração, com velocidades de filtração de 5 e 10 cm/s, velocidade de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, e utilizando poliéster, polipropileno e acrílico como meios filtrante, totalizando 230 ciclos de filtração analisados. Para a análise dos *patches* removidos foram utilizados os ensaios com tortas mais

grossas, obtidas com perda de carga máxima de 3920 Pa, porque tortas mais espessas oferecem uma maior facilidade de limpeza, tornando mais fácil a análise das imagens.

A Tabela 3.3 apresenta esquematicamente os ensaios que foram realizados durante o trabalho, bem como suas condições operacionais.

3.4.1 Cálculo da vazão de alimentação de pó

A vazão de alimentação foi estimada através da massa de pó necessária para preencher o sulco do prato de alimentação. Foram feitas três medidas da massa de pó, obtendo-se a média entre elas. A vazão mássica pode, então, ser calculada através da Equação 3.1.

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

Em que, M é a massa de pó e t o tempo de rotação do prato.

3.4.2 Cálculo da carga mássica

Os valores de carga mássica foram calculados ponto a ponto segundo a Equação 3.2.

$$W = \frac{M_t \cdot t_i}{A \cdot t_i} \quad (3.2)$$

sendo que: W é a carga mássica (g/cm^2), M_t é a massa total do ciclo de filtração $t_t(\text{s})$ é o tempo total do ciclo de filtração, $t_i(\text{s})$ o tempo correspondente ao ponto calculado e A (cm^2) é a área de filtração.

Tabela 3.3 - Esquema dos ensaios realizados

Tecido	Velocidade de Filtração (cm/s)	Ensaio	Velocidade de Limpeza (cm/s)	Perda de Carga Máxima (cm H ₂ O)	Material Particulado
Acrílico	5	1	5	3920	Rocha Fosfática D = 4,5 μm
		2	10		
		3	15		
	10	4	10	1960	
		5	15		
		6	10	3920	
		7	15		
		8	10	5880	
		9	15		
Poliéster	5	10	5	3920	
		11	10		
		12	15		
	10	13	10	1960	
		14	15		
		15	10		
Polipropileno	5	16	15	3920	
		17	5		
		18	10		
	10	19	15	3920	
		20	10		
		21	15	1960	
		22	10		
23	15	3920			

Preferiu-se construir as curvas em função da carga mássica a construí-las em função do tempo de filtração, devido a dificuldades de operação do equipamento, já que pequenas variações na concentração de pó podem ter ocorrido, o que é corrigido ao usar-se esse parâmetro.

3.4.3 Cálculo da porosidade

Através da Equação de Ergun (Equação 2.14), desconsiderando o termo inercial e sendo L a espessura da torta, pôde-se estimar a porosidade da torta (ϵ), para um dado conjunto de condições experimentais e ΔP medido em função de t , através da Equação (2.18).

Foram realizadas para cada ensaio de 10 ciclos de filtração, medidas de porosidade para todos os ciclos, para análise do comportamento da porosidade conforme o número de ciclos.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1-\epsilon)^2 \cdot \mu \cdot V_F}{\epsilon^3 \cdot d_p^2} + 1,75 \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot V_F^2}{d_p} \quad (2.14)$$

$$\frac{\Delta P}{t} = 150 \cdot \frac{(1-\epsilon) \cdot \mu \cdot Q \cdot V_F}{\epsilon^3 \cdot A \cdot \rho_p \cdot d_p^2} \quad (2.18)$$

Existem outras equações que também são utilizadas para calcular a perda de carga através da deposição da torta sobre um meio filtrante, também podendo ser usadas para estimar valores da porosidade da torta. Outras equações bastante utilizadas são: equação de Kozeny-Carman; equação de Rundnick-Happel; equação de Gupta; equação de MacDonald entre outra, conforme menciona Ito (2002).

Ito (2002) estudou a porosidade de tortas de filtração utilizando o método direto e comparou os resultados com os valores de porosidade estimados através de equações de Ergun e de MacDonald e chegou a resultados próximos ao usar essas duas equações, com desvios de 2,0 a 5,5%. Neste trabalho a porosidade das tortas de filtração foi estimada utilizando a equação de Ergun (Equação 2.14).

3.4.4 Cálculo da resistência específica da torta (k_c')

O valor da resistência específica da torta, k_c' , foi estimado a partir de medidas experimentais, como apresentada na Equação 2.13, 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.

$$k_c' = \frac{A \cdot (\Delta P_2 - \Delta P_1)}{V_f \cdot (M_2 - M_1)} \quad (2.13)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Capítulo 4 se refere à apresentação dos resultados obtidos e encontra-se subdividido em itens que tratam da influência de cada condição operacional estudada na formação e remoção da torta, bem como na análise do fenômeno *patchy cleaning*.

No item 4.1 foi analisada a influência estrutural dos tecidos no processo de filtração e regeneração dos meios filtrantes. No item 4.2 foi feita análise da influência da perda de carga máxima, ou espessura da torta, na formação e remoção da torta. O item 4.3 tratou da influência da velocidade de limpeza na filtração e regeneração do tecido. No item 4.4 foi realizado o estudo da influência da velocidade de filtração no processo de formação e remoção de tortas. E, por fim, o item 4.5 se refere ao estudo dos *patches* removidos para as diferentes condições operacionais utilizadas.

4.1 Influência da estrutura do tecido na filtração e regeneração do tecido

Esse item se refere à análise da influência da estrutura dos tecidos na filtração e regeneração dos mesmos.

A comparação de 10 ciclos de filtração e limpeza, para os três tecidos estudados, para uma perda de pressão máxima de 3920 Pa, velocidade de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 10 cm/s encontra-se ilustrada na Figura 4.1.1. Também foram construídas curvas de perda de carga em função da carga mássica para cada ciclo de filtração, Figura 4.1.2.

Observando a Figura 4.1.1 pode-se notar claramente as diferenças no processo de filtração para os diferentes meios filtrantes. Nota-se que o acrílico apresentou tempo de filtração maior, que pode ser justificado por sua maior

permeabilidades ao ar, conforme apresentado na Tabela 3.2, e confirma a constatação de Kanaoka et al. (2001) de que o tempo de filtração é maior para filtros de maior permeabilidade.

Portanto fica claro que a permeabilidade do filtro é um parâmetro importante, porque filtros pouco permeáveis possuem um incremento de perda de carga mais elevado, tendo como consequência menores coleta de partículas para uma determinada perda de carga máxima, o que torna o processo economicamente menos vantajoso.

Através da Figura 4.1.2 esse fato fica claro. Pode ser visto que, em todos os ciclos de filtração, o acrílico apresentou maiores valores de carga mássica para atingir a mesma perda de carga máxima. Portanto esse tecido mostrou-se mais adequado, já que pode ser utilizado por períodos maiores até que seja necessária sua limpeza.

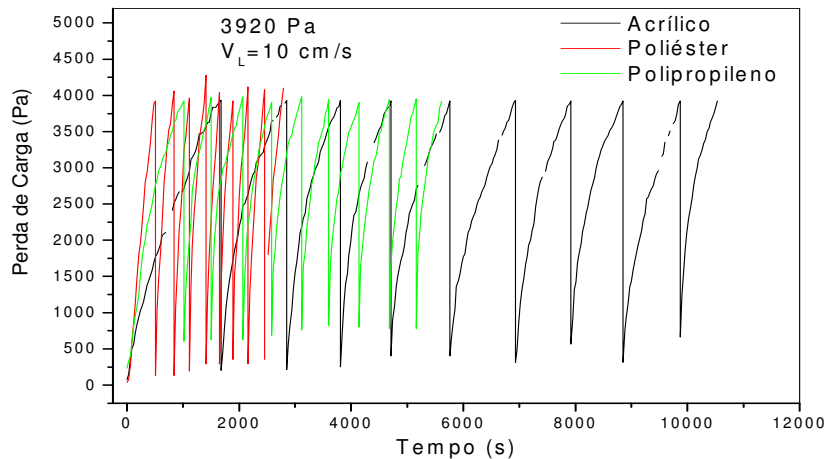


Figura 4.1.1. Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 10 cm/s

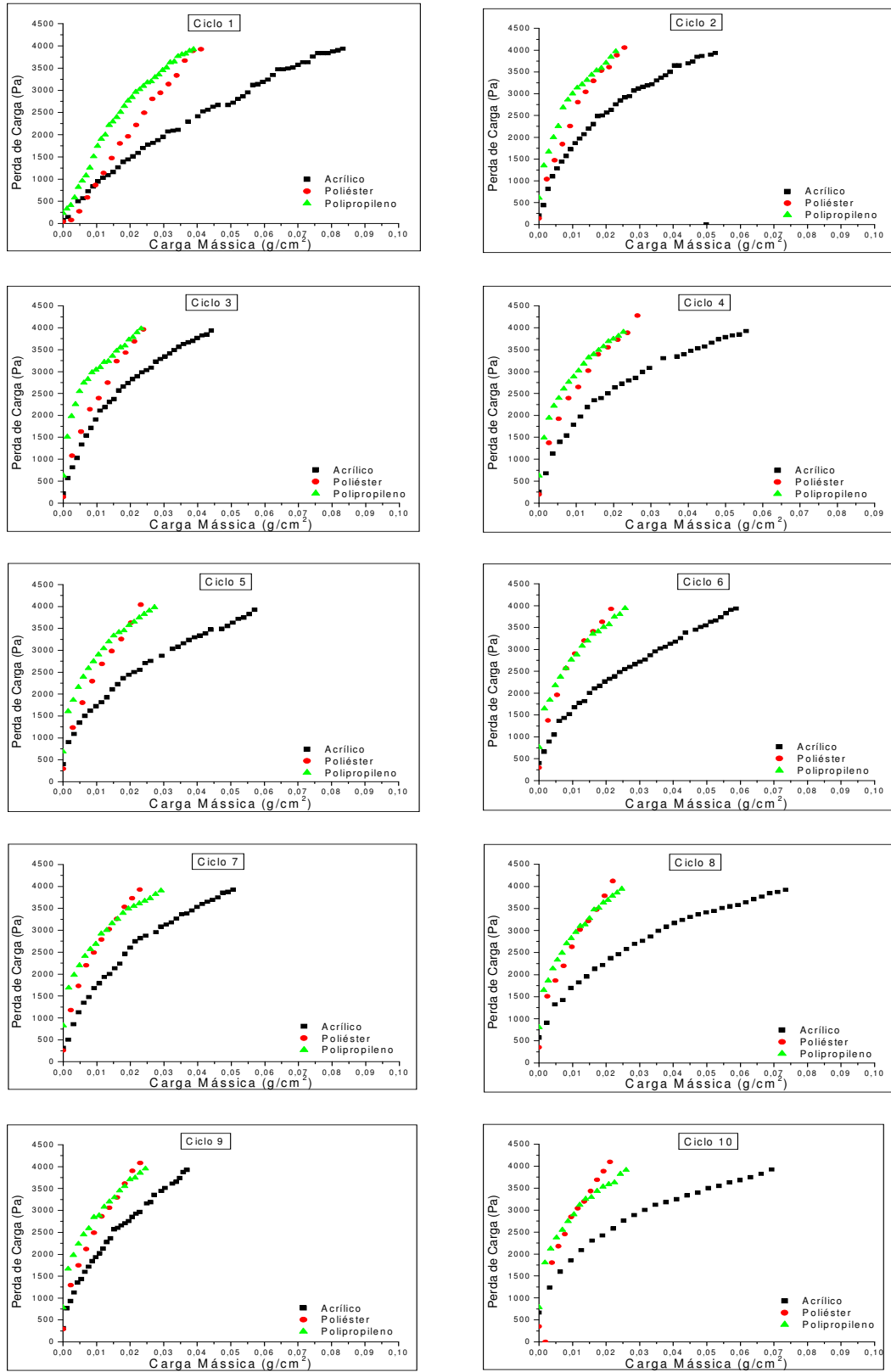


Figura 4.1.2. Ciclos de filtração: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa, velocidades de limpeza de 10 cm/s e acrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrante

Como esperado, o ponto de colmatação, conforme visto na Tabela 4.1.1, foi menor para tecidos menos permeáveis e menos porosos. No caso o polipropileno, possui menor espaço interno para acomodação das partículas, e, neste caso, a formação de tortas ocorreu mais rapidamente e apenas na superfície do tecido. Este mesmo comportamento foi observado nos estudos de Graef et al. (1995) e Walsh (1996) que concluíram que a colmatação ocorre mais rapidamente para filtros mais densamente empacotados, já que há um menor espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas.

Um ponto de colmatação maior, a princípio, torna o tecido mais apropriado para o processo de filtração, por oferecer menores valores de perda de carga, no entanto esse parâmetro não pode ser analisado isoladamente.

Tabela 4.1.1 - Ponto de colmatação para diferentes tecidos

Tecido	Ponto de Colmatação (g/cm ²)
Acrílico	0,0034
Poliéster	0,0020
Polipropileno	0,0007

O comportamento da filtração interna, verificada através do primeiro ciclo de filtração, em que ocorre a coleta de partículas no interior do meio filtrante, pode ser observado na Figura 4.1.3.

O polipropileno, tecido com menor abertura superficial, menos poroso e menos permeável apresentou um período de filtração interna praticamente inexistente já que sua curva de filtração foi linear desde o início do processo, caracterizando uma

filtração superficial, com baixa penetração de partículas no interior do tecido, como visto no trabalho de Rodrigues (2006), rápida formação de torta de filtração e grande acúmulo de partículas na superfície do tecido, o que facilita a limpeza do tecido.

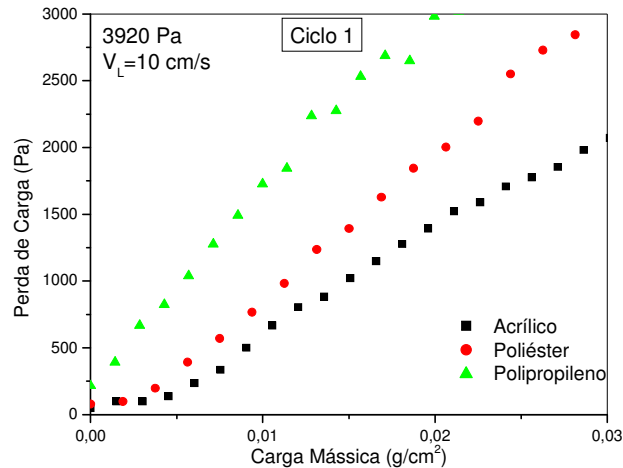


Figura 4.1.3. Primeiro ciclo de filtração para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

A maior abertura superficial e a permeabilidade do acrílico resultaram em maiores períodos de filtração interna para esse tecido, gerando uma curva de filtração mais convexa no início do processo de filtração.

A fim de investigar a relação do tempo de filtração, ponto de colmatção e estrutura do tecido com a massa de pó coletada em cada ciclo de filtração e a massa retida acumulada no tecido após a limpeza foram construídas as Figuras 4.1.4, 4.1.5 e 4.1.6.

Como a taxa de alimentação de pó no ar durante a operação de filtração era mantida constante, tempo de filtração maior significa maior quantidade de partícula coletada, para um mesmo valor de perda de carga, fato observado na Figura 4.1.4.

Analisando a Figura 4.1.4 nota-se que em todos os ensaios a massa coletada no primeiro ciclo é bem maior que nos demais ciclos para cada tecido, tendendo a permanecer constante posteriormente, devido à saturação do meio filtrante.

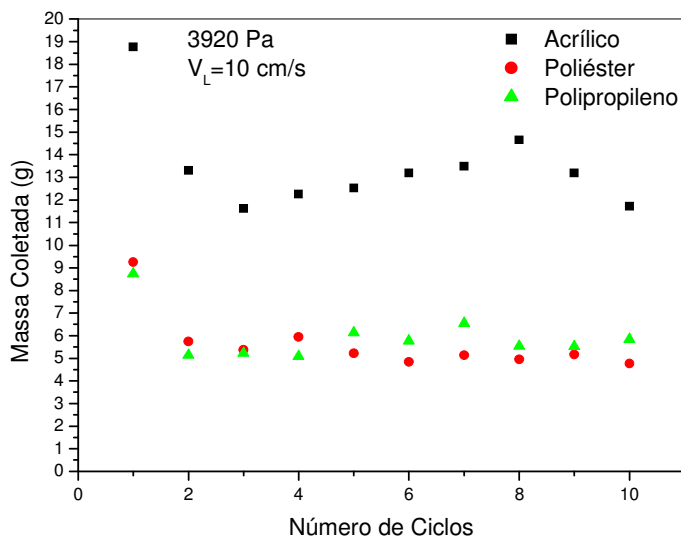


Figura 4.1.4. Massa coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

Como o poliéster e o polipropileno possuem valores muito diferentes de permeabilidade e porosidade, porém coletaram a mesma quantidade de partículas, verifica-se que além das propriedades estruturais dos filtros, a torta formada teve grande influência no processo de filtração e regeneração do tecido, sendo que a porosidade e a resistência específica da torta variaram de tecido para tecido e também ao longo dos ciclos, como observado nas Figuras 4.1.5 (a) e (b). Portanto, fica claro que o meio filtrante exerce influência na formação da torta.

Analisando a Figura 4.1.5, nota-se que, conforme esperado, tortas menos porosas, Figura 4.1.5 (a), tiveram valores de resistência específica de tortas maiores, Figura 4.1.5 (b). Percebe-se também, que o acrílico, meio filtrante mais permeável,

formou tortas mais porosas e com menor resistência específica que teve como consequência uma maior coleta de partículas.

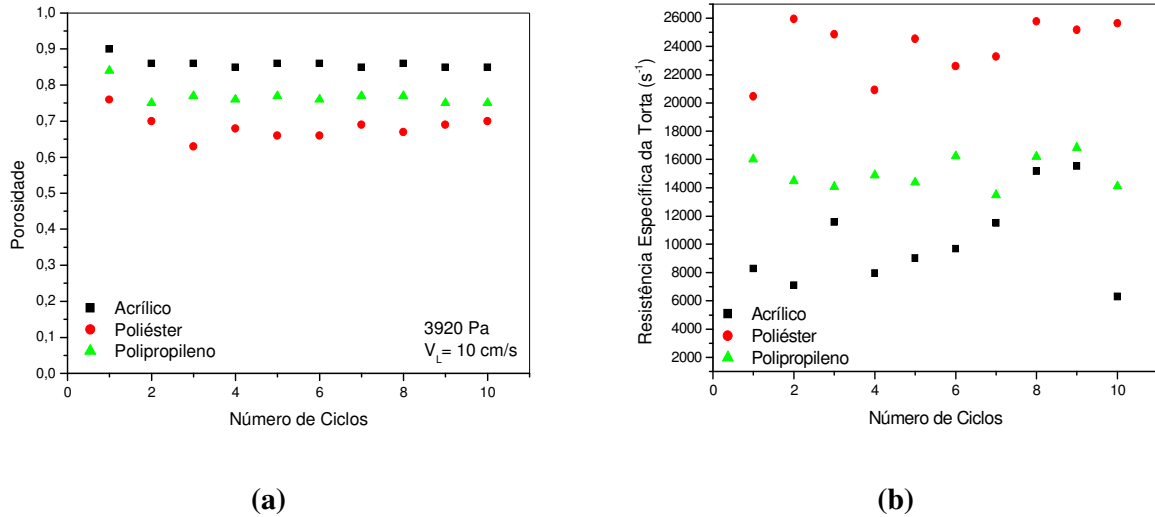


Figura 4.1.5. Características da torta para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta

O poliéster e o polipropileno, tecidos com menores aberturas superficiais, coletarem a mesma quantidade de massa, apesar das diferentes tortas formadas.

Os valores de massa coletada também estão relacionados com a massa retida no tecido após a limpeza. Com o intuito de analisar esse fato foi construída a Figura 4.1.6.

Nota-se que o acrílico apresentou maiores valores de massa retida no tecido após a limpeza. Esse fato está relacionado à sua maior abertura superficial, facilitando a penetração no interior do tecido, comprovado pelo seu maior ponto de colmatação, o que dificulta a remoção das mesmas. Apesar disso, como visto anteriormente, foi o tecido que possibilitou a maior coleta de massa por sua maior abertura oferecendo uma melhor acomodação para as partículas no interior do tecido, gerando tortas mais porosas e menos resistentes.

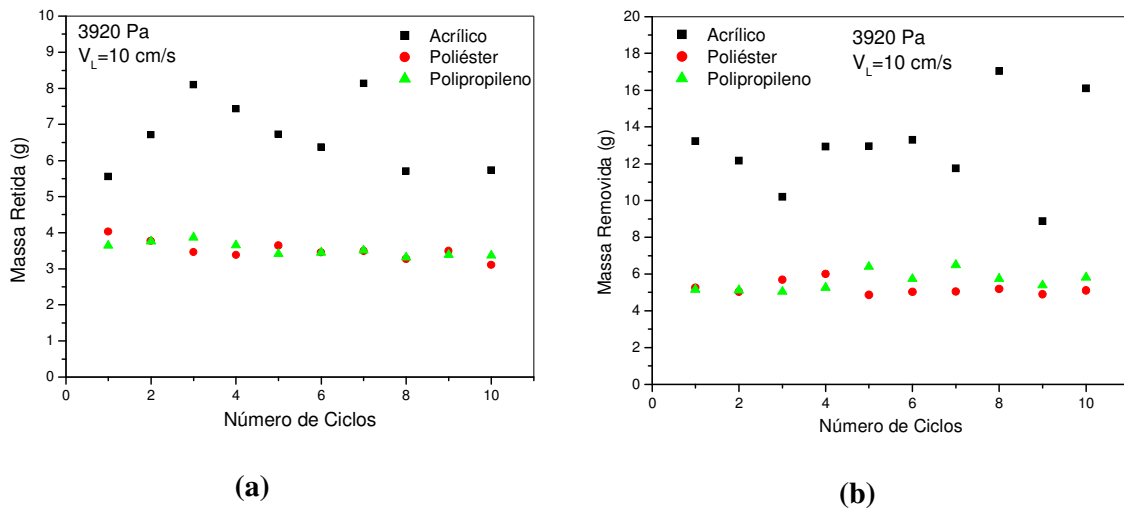


Figura 4.1.6. (a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

Segundo observações de Mauschitz et al. (2004), tecidos mais porosos apresentam maior massa retida após a limpeza. Esse fato não foi comprovado nessas condições experimentais, porque o poliéster é o tecido mais poroso, seguido do acrílico e do polipropileno. No entanto, o acrílico foi o tecido que reteve mais massa, seguido do poliéster e do polipropileno que tiveram valores muito próximos. Fica claro que a porosidade do tecido deve ser analisada juntamente com sua permeabilidade, esta última talvez possa exercer uma influência mais efetiva nos valores de massa retida.

A massa retida está relacionada com a perda de carga residual do meio filtrante, para melhor investigar esse fato a curva de perda de carga residual em função do número de ciclos está apresentada na Figura 4.1.7.

Através das Figuras 4.1.6 e 4.1.7 fica claro que a massa retida não é a única responsável pela perda de carga residual, porque, analisando essas figuras, percebe-se que o acrílico teve valores muito mais altos de massa retida que polipropileno. No entanto a curva de perda de carga residual do polipropileno foi maior que a curva do

acrílico. Esse fato pode estar relacionado com a estrutura dos tecidos, apresentados pela Tabela 3.2. O polipropileno é o tecido menos permeável e foi o tecido que apresentou menores valores de massa retida, juntamente com o poliéster. Entretanto foi o tecido que apresentou maiores valores de perda de carga residual. Esse fato indica que embora a quantidade de partículas remanescentes nesse tecido tenha sido menor, elas são responsáveis por uma maior resistência ao fluxo, devido o menor espaçamento entre as fibras desse tecido, obstruindo a passagem de ar.

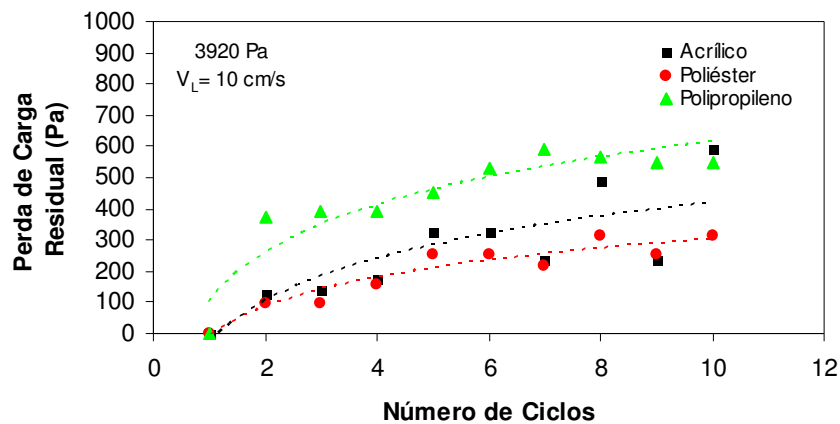


Figura 4.1.7. Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

Em indústrias os meios filtrantes são avaliados e escolhidos pelo comportamento das curvas de perda de carga residual. Nesse trabalho fica provado que esse não é um bom parâmetro para analisar qual melhor meio filtrante, porque o poliéster apresentou menores valores de perda de carga residual, porém o acrílico apresentou maiores valores de massa coletada para uma mesma perda de carga máxima, sendo assim, o acrílico se mostrou economicamente mais vantajoso, necessitando de

regenerações menos frequentes, conseqüentemente, menos interrupções no processo de filtração e maior vida útil do tecido.

A Figura 4.1.8 ilustra 10 ciclos de filtração e limpeza para uma perda de carga máxima de 3920 Pa, velocidade de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 15 cm/s.

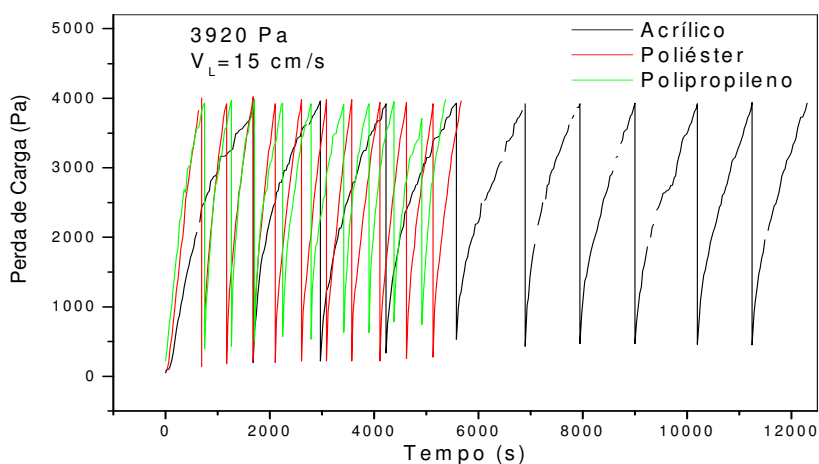


Figura 4.1.8. Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 15 cm/s

Através da Figura 4.1.8 observa-se que o acrílico apresentou novamente ciclos de filtração mais longos nessas condições operacionais. No entanto, o poliéster e o polipropileno apresentaram tempo de filtração muito aproximados, diferente do observado na Figura 4.1.1.

Para melhor entendimento desse fato foram construídas curvas de perda de carga em função da carga mássica a cada ciclo, Figura 4.1.9 e também de massa coletada a cada ciclo de filtração, Figura 4.1.10.

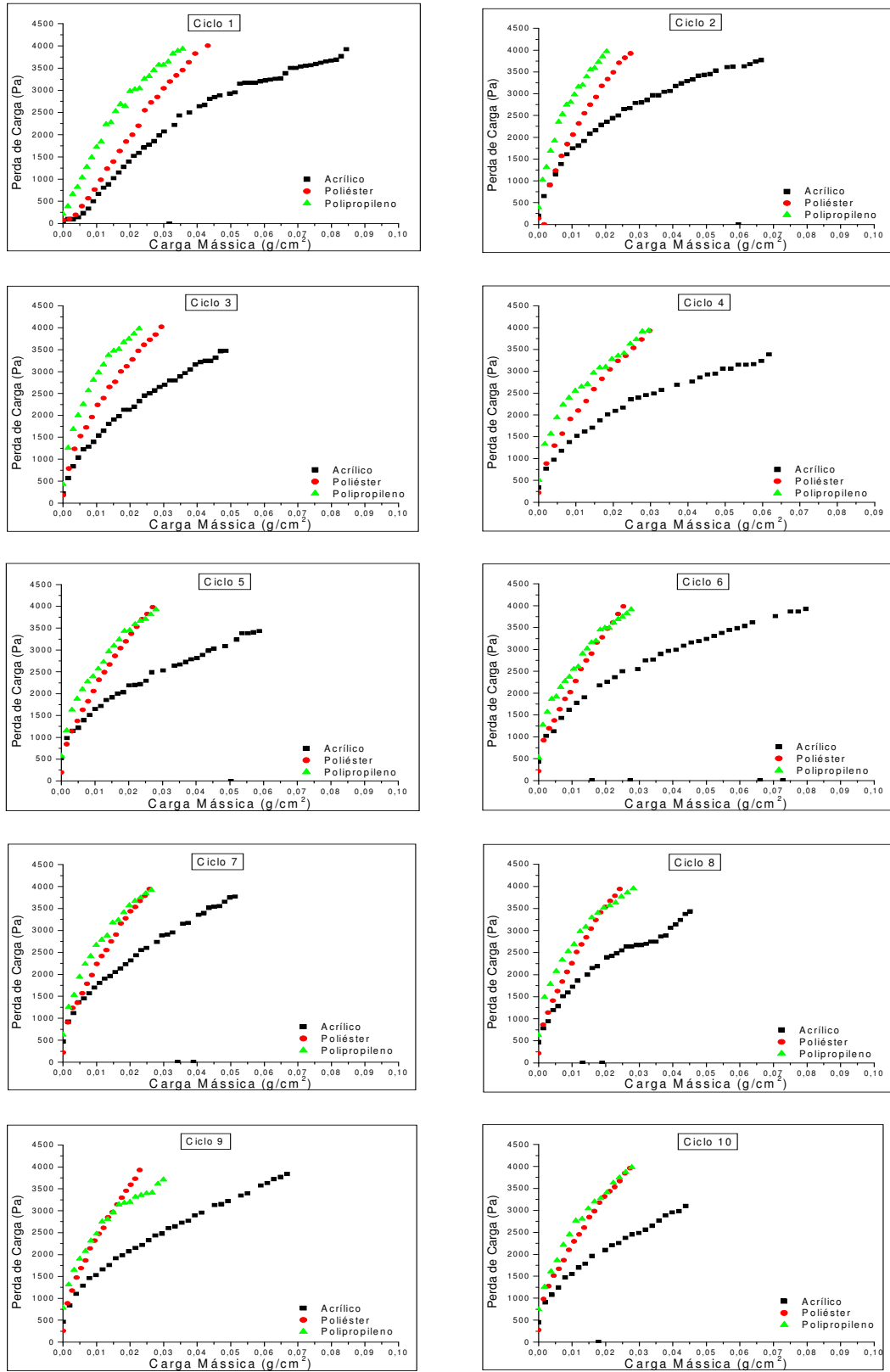


Figura 4.1.9. Ciclos de filtração: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga mássima de 3920 Pa, velocidades de limpeza de 15 cm/s e acrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrante

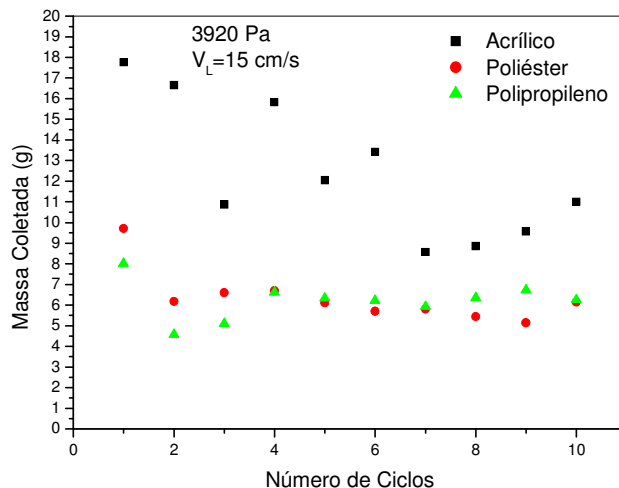


Figura 4.1.10. Massa coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

A Figura 4.1.9 ilustra um comportamento de filtração, para os três tecidos estudados, parecido ao comportamento ilustrado pela Figura 4.1.2, na qual o acrílico também apresentou maiores valores de carga mássica para o mesmo valor de perda de carga. Conseqüentemente esse tecido foi capaz de coletar maior quantidade de partículas e o poliéster e o polipropileno coletaram praticamente a mesma quantidade de partículas, conforme visto na Figura 4.1.10.

Também, foram construídas curvas de massa retida e massa removida nessas condições operacionais, essas curvas estão ilustradas nas Figuras 4.1.11 (a) e (b), respectivamente.

Comparando as Figuras 4.1.6 e 4.1.11, nota-se que para velocidade de limpeza maior, 15 cm/s, o poliéster apresentou menores valores de massa retida que o polipropileno, sendo que, como pode ser visto na Figura 4.1.6, para uma velocidade de limpeza menor, 10 cm/s esses dois tecidos apresentaram a mesma quantidade de massa retida. O aumento da velocidade de limpeza foi mais eficiente para o poliéster, tecido

mais poroso e mais permeável, possivelmente porque possibilitou a melhor remoção das partículas que se encontravam retidas no interior do tecido.

Osório (2006) estudou a influência da velocidade de limpeza em filtros de celulose e também verificou que, para filtros mais permeáveis, o aumento na velocidade de limpeza causou uma melhor regeneração do filtro, tornando o processo mais vantajoso.

Como no polipropileno ocorre a formação de tortas superficiais uma menor velocidade de limpeza já foi suficiente para a remoção da torta. O estudo da influência da velocidade de limpeza foi realizado no item 4.3.

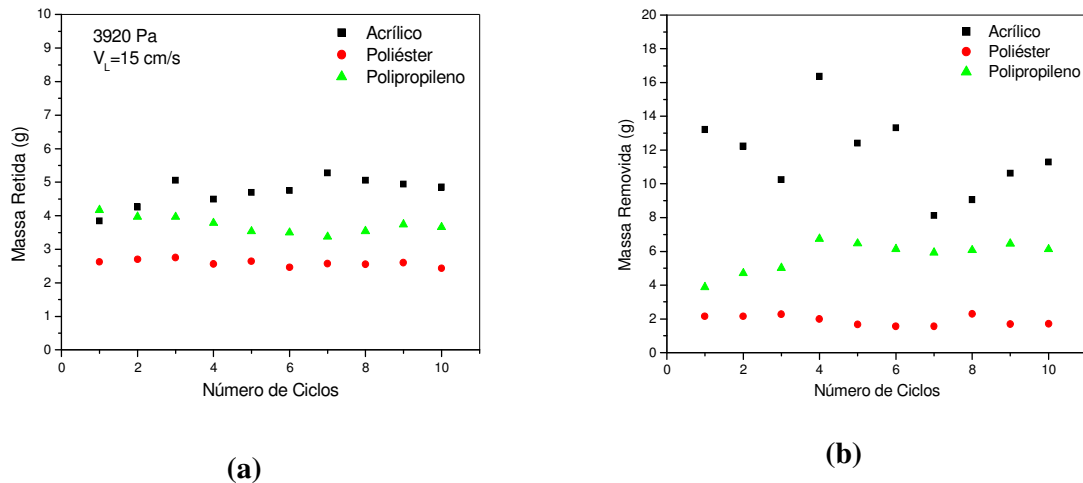


Figura 4.1.11 (a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

Curvas de perda de carga residual em função do número de ciclos, que também foram construídas para essas condições operacionais, encontram-se ilustradas na Figura 4.1.12.

Como observado na Figura 4.1.12, as curvas de perda de carga residual para o acrílico e para o polipropileno foram bem aproximadas, apesar de o acrílico ter retido

mais massa após a limpeza. Isso acontece, como explicado anteriormente, devido ao menor espaçamento entre as fibras do polipropileno, em que pequena quantidade de partículas causa a obstrução da passagem de ar.

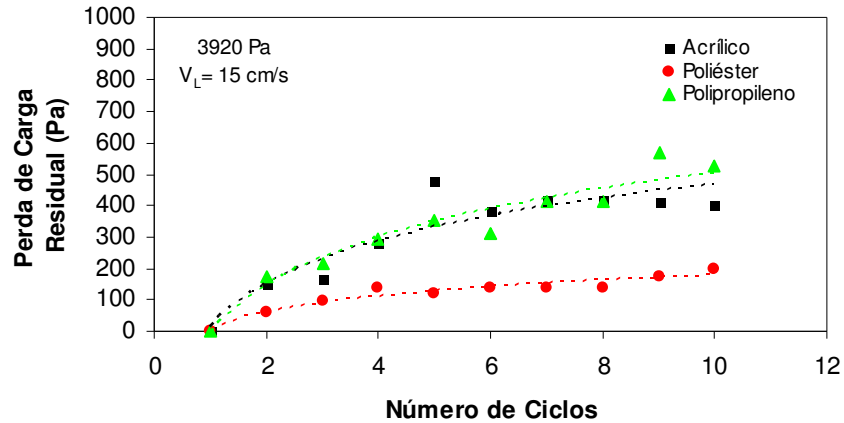


Figura 4.1.12. Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

A influência da estrutura do tecido também foi verificada para tortas mais finas, formadas com perda de carga máxima de 1960 Pa. A Figura 4.1.13 ilustra 10 ciclos de filtração e limpeza para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, velocidade de filtração de 5 cm/s e velocidade de limpeza de 10 cm/s.

Através da análise da Figura 4.1.13 nota-se que, para tortas mais finas o tempo de filtração para os diferentes meios filtrantes foram próximos entre si. A diferença entre tortas finas e grossas foi mais evidente para o acrílico, que para tortas mais espessas teve um tempo de filtração muito mais longo que os demais tecidos. Essa constatação leva a concluir que essa diferença está mais relacionada à estrutura da torta formada que às estruturas do tecido, já que depois que a torta é formada ela que é responsável pela filtração. Observando a Figura 4.1.16 nota-se que o acrílico formou tortas mais porosas e menos resistentes, possibilitando maior coleta de partículas.

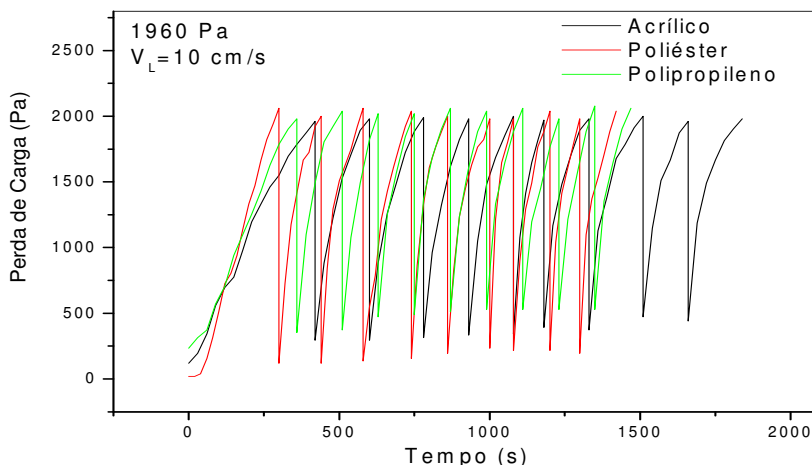


Figura 4.1.13. Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 cm/s

Curvas de perda de carga em função da carga mássica a cada ciclo foram construídas, Figura 4.1.14.

A análise da Figura 4.1.14 comprova o comportamento muito semelhante dos três tecidos estudados nessas condições operacionais.

A curva de massa coletada em função do número de ciclos está ilustrada na Figura 4.1.15.

A proximidade do tempo de duração dos ciclos de filtração se refletiu nos valores muito próximos de massa coletada para os três tecidos nessas condições experimentais, sendo assim confirma-se que a maior coleta de partículas com o acrílico e tortas mais grossas se deve a estrutura da torta de filtração.

Nota-se que, nessas condições operacionais, a torta formada com o acrílico como meio filtrante teve valores de porosidade e de resistência específica da torta mais aproximados dos valores das tortas formadas com outros tecidos, fato este que pode ser observado através da Figura 4.1.16.

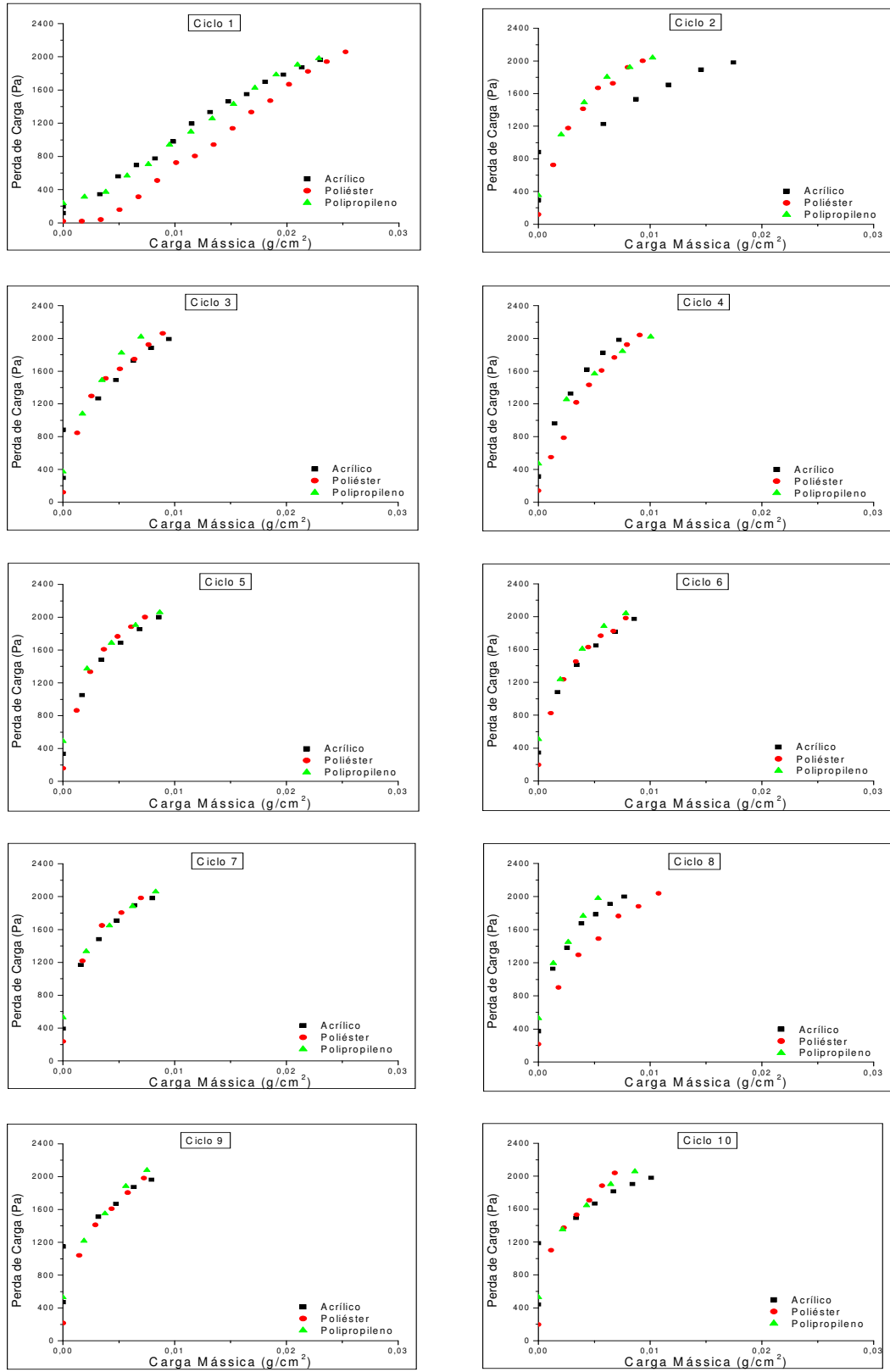


Figura 4.1.14. Ciclos de filtração: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1920 Pa, velocidades de limpeza de 10 cm/s eacrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrante.

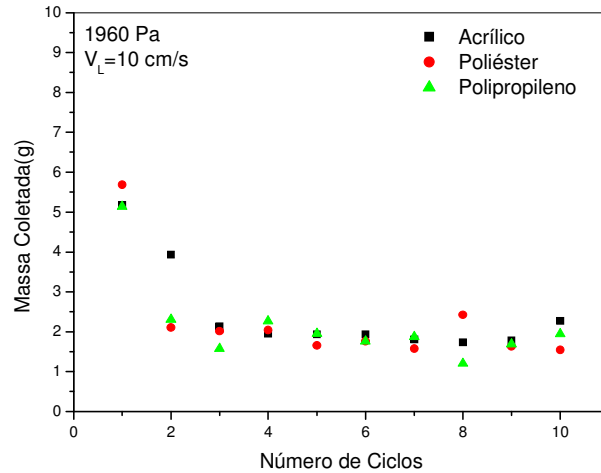


Figura 4.1.15. Massa coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa

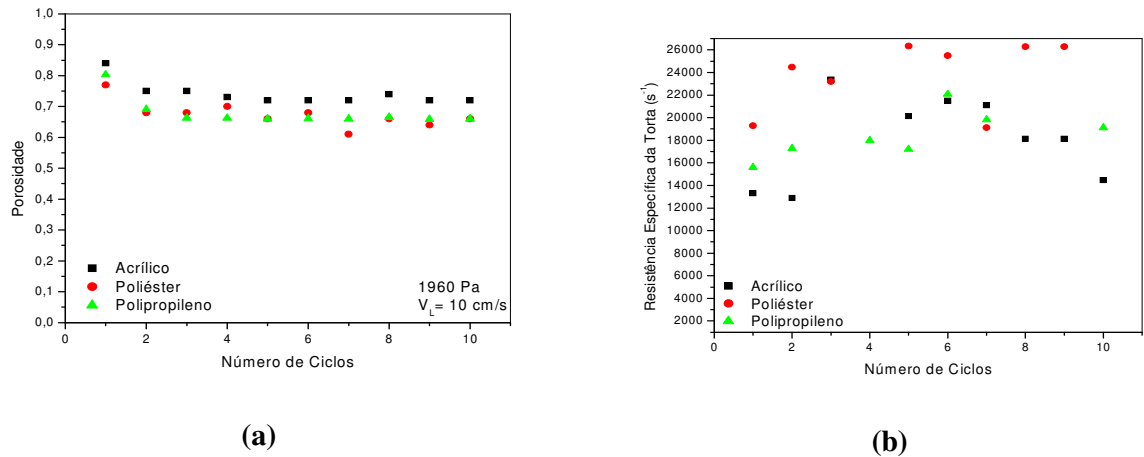


Figura 4.1.16. Características da torta coletada para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa .(a) porosidade e (b) resistência específica da torta

As diferenças na estrutura do tecido também se refletem na quantidade de massa retida, como pode ser visto na Figura 4.1.17, que para tortas menos espessas também foram evidentes, sendo que, o acrílico, tecido mais permeável, teve maiores valores de massa retida também nessas condições operacionais.

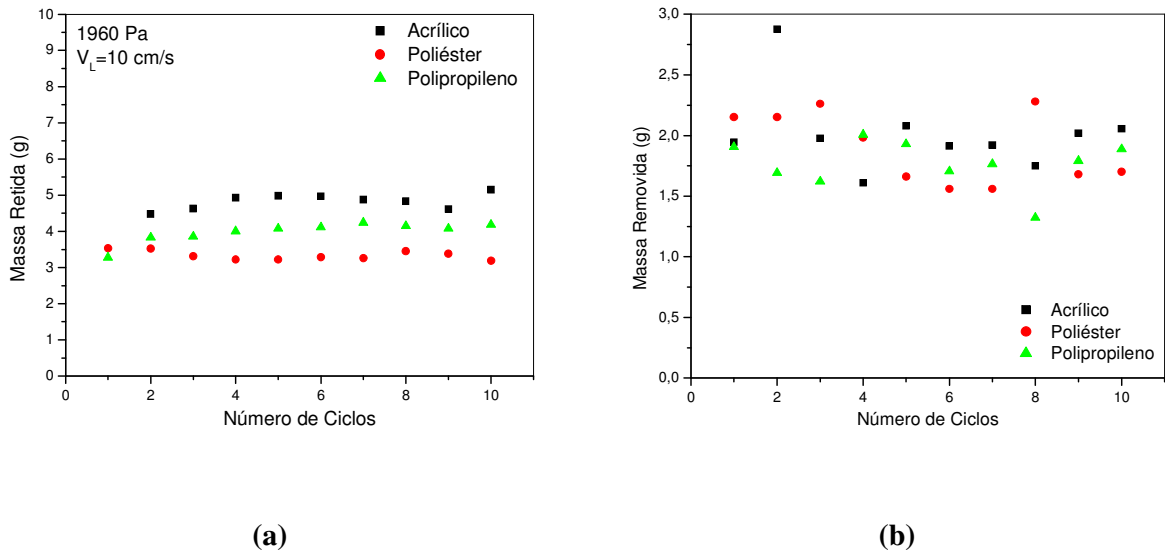


Figura 4.1.17. (a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa.

Curvas de perda de carga residual em função do número de ciclos também foram construídas para essas condições operacionais e encontram-se ilustradas na Figura 4.1.18.

Já com a avaliação da perda de carga residual verifica-se que, o acrílico, tecido com valor de permeabilidade próximo ao do poliéster, teve valores de perda de carga residuais mais elevados que este último o que pode ser justificado por sua maior massa retida. A diferença na eficiência dos tratamentos realizados para esses tecidos pode justificar esse fato.

A Figura 3.2 mostra que os tratamentos dos meios filtrantes foram mais eficientes para o poliéster que para o acrílico, dificultando a penetração de partículas no poliéster, justificando a menor quantidade de massa retida e menor perda de carga residual.

Ao comparar-se o acrílico e o polipropileno nota-se que as curvas de perda de carga residual foram idênticas, apesar dos diferentes valores de massa retida. O polipropileno teve menor quantidade de partículas retidas após a limpeza, no entanto, como já discutido anteriormente, essas partículas geram uma maior perda de carga residual devido à baixa porosidade e permeabilidade desse tecido, obstruindo passagem do fluxo.

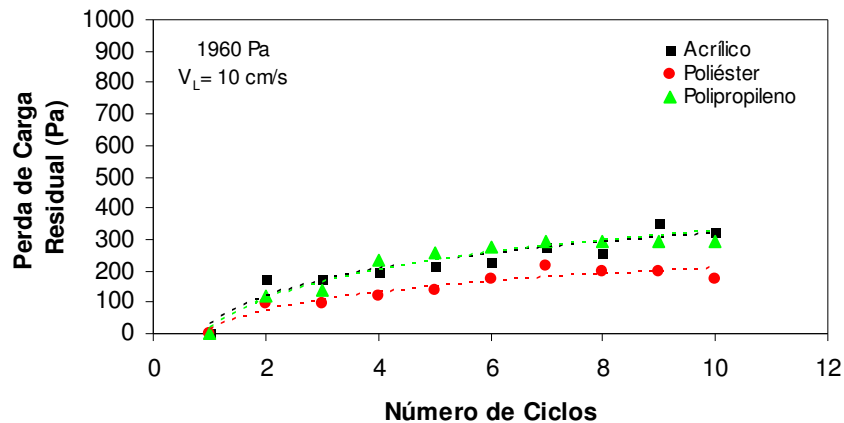


Figura 4.1.18. Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa

A Figura 4.1.19 ilustra 10 ciclos de filtração e limpeza para uma perda de carga máxima de 1960 Pa, velocidade de filtração de 5cm/s e velocidade de limpeza de 15 cm/s.

Novamente o acrílico apresentou tempo de filtração maior, devido sua maior permeabilidade, conforme apresentado na Tabela 3.2, o que significa maior quantidade de partículas coletadas, para um mesmo valor de perda de carga. O poliéster e o polipropileno apresentaram tempo de filtração muito próximos, como também ocorreu nos ensaios anteriores.

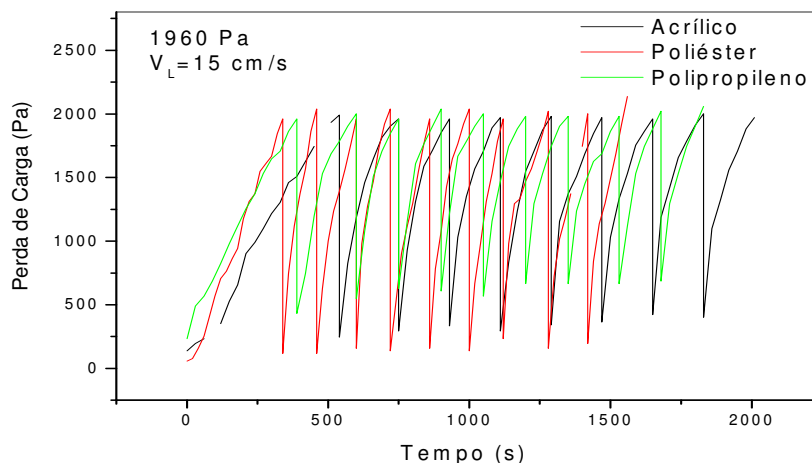


Figura 4.1.19. Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 15 cm/s

Curvas de perda de carga em função da carga mássica a cada ciclo foram construídas e estão apresentadas na Figura 4.1.20.

A comparação da Figura 4.1.14 com a Figura 4.1.20 mostra que para tortas finas a velocidade de limpeza não exerceu grande influência no comportamento de filtração.

A curva de massa coletada em função do número de ciclos está ilustrada na Figura 4.1.21.

Comparando a Figura 4.1.21 com a Figura 4.1.15 nota-se que o aumento na velocidade de limpeza teve como consequência o aumento da massa coletada, que foi mais evidente para o poliéster que teve um aumento de 64% de massa coletada. Já para o acrílico esse aumento da velocidade de limpeza não teve influência na massa coletada, que foi praticamente a mesma nos dois ensaios, a diferença de massa coletada foi em média apenas 7% maior.

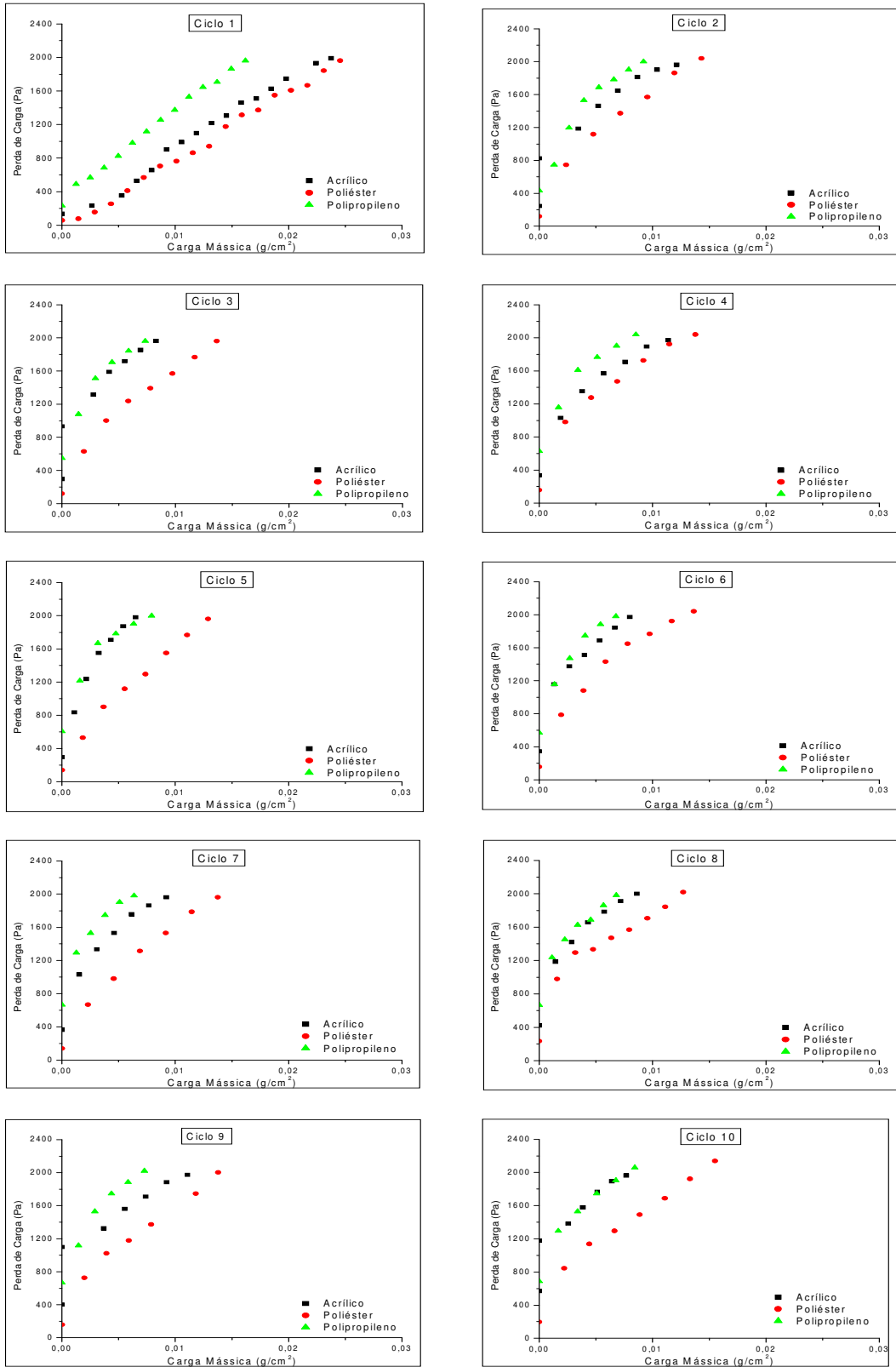


Figura 4.1.20. Ciclos de filtração para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 15 cm/s

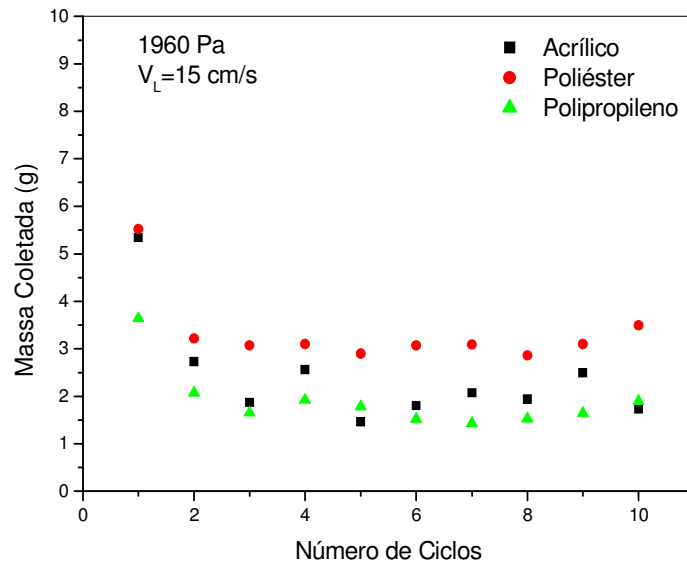


Figura 4.1.21. Massa coletada para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 15 cm/s

O polipropileno apresentou um comportamento inicialmente inesperado, porque a massa coletada para uma velocidade de limpeza maior, 15 cm/s, foi menor que a massa coletada para uma velocidade de limpeza menor, 10 cm/s. Isso pode ser explicado pela sua menor abertura superficial, e menor permeabilidade, levando a formação de tortas na superfície do tecido, que foram mais facilmente removidas com velocidades menores.

A Figura 4.1.22 (a) ilustra a porosidade da torta formada nessas condições operacionais e a Figura 4.1.22 (b) a resistência específica dessa torta. Percebe-se que, mais uma vez, as tortas formadas utilizando o acrílico como meio filtrante tiveram maiores valores de porosidade e menor resistência específica.

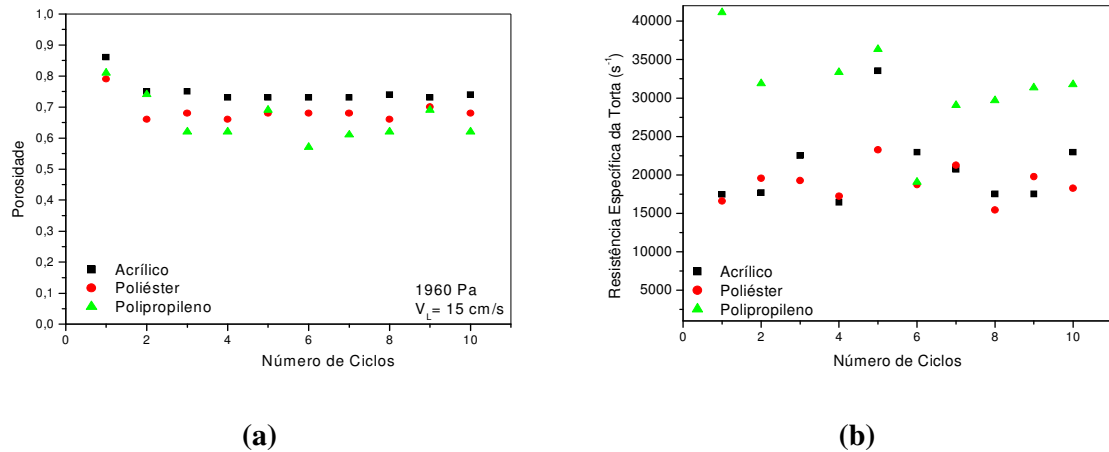


Figura 4.1.22. Características da torta coletada para os diferentes tecidos estudados: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidades de limpeza de 15 cm/s. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta

Foram construídas curvas de massa retida e massa removida nessas condições operacionais, essas curvas estão ilustradas nas Figuras 4.1.23.

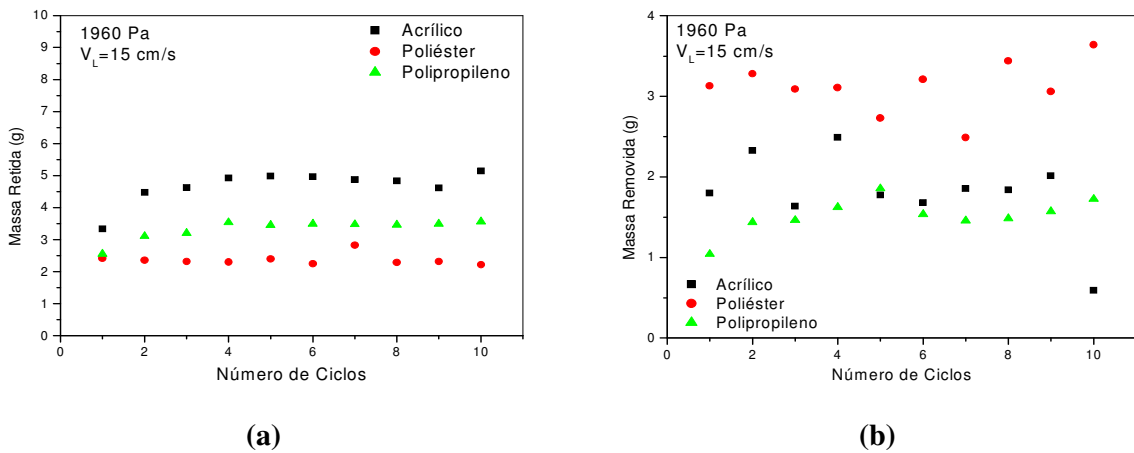


Figura 4.1.23. (a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa

Nota-se, através da Figura 4.1.23 (a), que o acrílico novamente foi o tecido que apresentou maiores valores de massa retida. Esse fato está relacionado a sua maior

abertura superficial, facilitando a penetração no interior do tecido, o que dificulta a remoção das mesmas.

Curvas de perda de carga residual em função do número de ciclos também foram construídas para essas condições operacionais e encontram-se ilustradas na Figura 4.1.24.

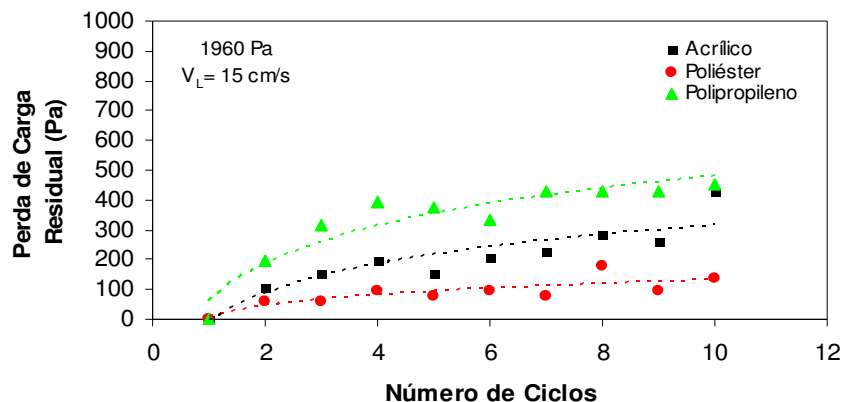


Figura 4.1.24. Perda de carga residual para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 Pa

Mais uma vez o polipropileno foi o tecido que apresentou maiores valores de perda de carga residual, apesar de ter sido novamente o tecido com menor massa acumulada retida no tecido após a limpeza, como discutido anteriormente. Esse fato está relacionado com as características estruturais desse tecido, que apresentou menor porosidade e permeabilidade.

4.2 Influência da espessura da torta na filtração e regeneração do tecido

Com o intuito de analisar a influência da espessura de tortas de filtração no comportamento do processo de filtração e regeneração de tecidos foram realizados ensaios de 10 ciclos de filtração e limpeza com espessuras de tortas diferentes. Para isso

foram construídas curvas de perda de carga em função da carga mássica, e também de perda de carga residual, massa retida, massa removida, eficiência de limpeza mássica e de área em função do número de ciclos para diferentes espessuras de tortas.

A seguir serão apresentadas figuras referentes ao comportamento de 10 ciclos de filtração e limpeza do tecido, Figura 4.2.1, poliéster, Figura 4.2.2, e polipropileno, Figura 4.2.3 utilizando uma velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidades de limpeza de 10cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa.

Nota-se no primeiro ciclo a reprodutibilidade dos resultados experimentais, através da grande semelhança entre as duas curvas. A partir do segundo ciclo observa-se que a curva de filtração é mais côncava e o aumento de perda de carga é bem acentuado, devido ao fenômeno conhecido como *patchy cleaning*. Sendo assim, o filtro não retorna as suas propriedades iniciais após a regeneração, o que explica a mudança do comportamento da curva de filtração do primeiro ciclo para os demais. Pode-se notar que na maioria dos ciclos as tortas formadas com perda de carga máxima de 1960 Pa, mais finas que as tortas formadas com perda de carga máxima de 3920 Pa, apresentaram uma perda de carga maior para a mesma carga mássica. Isso pode ser explicado pela diferença na regeneração do tecido.

Nota-se que o comportamento dos ciclos de filtração é semelhante ao ilustrado pela Figura 2.12, que ocorre no caso de regeneração incompleta do tecido.

Conforme dados da literatura e também dados obtidos nesse estudo, as tortas mais grossas são mais facilmente removidas, portanto o filtro após a regeneração possui características mais próximas do tecido limpo, justificando assim curvas com perdas de carga mais baixas. No entanto, as curvas vão se aproximando ciclo a ciclo, devido à saturação do tecido.

A análise da Figura 4.2.2, para o poliéster é semelhante a da Figura 4.2.1, para o acrílico. Verifica-se no primeiro ciclo uma grande contribuição da filtração interna. Nos demais ciclos um aumento relativamente rápido da perda de carga, caracterizando a filtração superficial. Nota-se, também, a mudança da curva de filtração do primeiro para os demais ciclos, devido à regeneração incompleta do meio filtrante e do fenômeno de *patchy cleaning*.

A diferença entre as curvas para as tortas mais finas e mais espessas foi menor que para o acrílico. Esse fato pode ser explicado por diferenças estruturais do tecido, o poliéster possui características que causam a filtração superficial. Dessa forma o aumento no valor de perda de carga máxima não gerou grande diferença no comportamento da filtração. Além disso, essa menor diferença pode ser justificada pelo fato da carga mássica do poliéster ser menor para uma mesma perda de carga. Ou seja, tortas mais espessas podem não ter tido espessura suficiente para facilitar a limpeza.

Analisando a Figura 4.2.3, para o polipropileno, observa-se que o mesmo apresentou um comportamento semelhante ao comportamento do poliéster, Figura 4.2.2, conforme o esperado. Tortas mais finas apresentaram perda de carga menor que às curvas de tortas mais espessas.

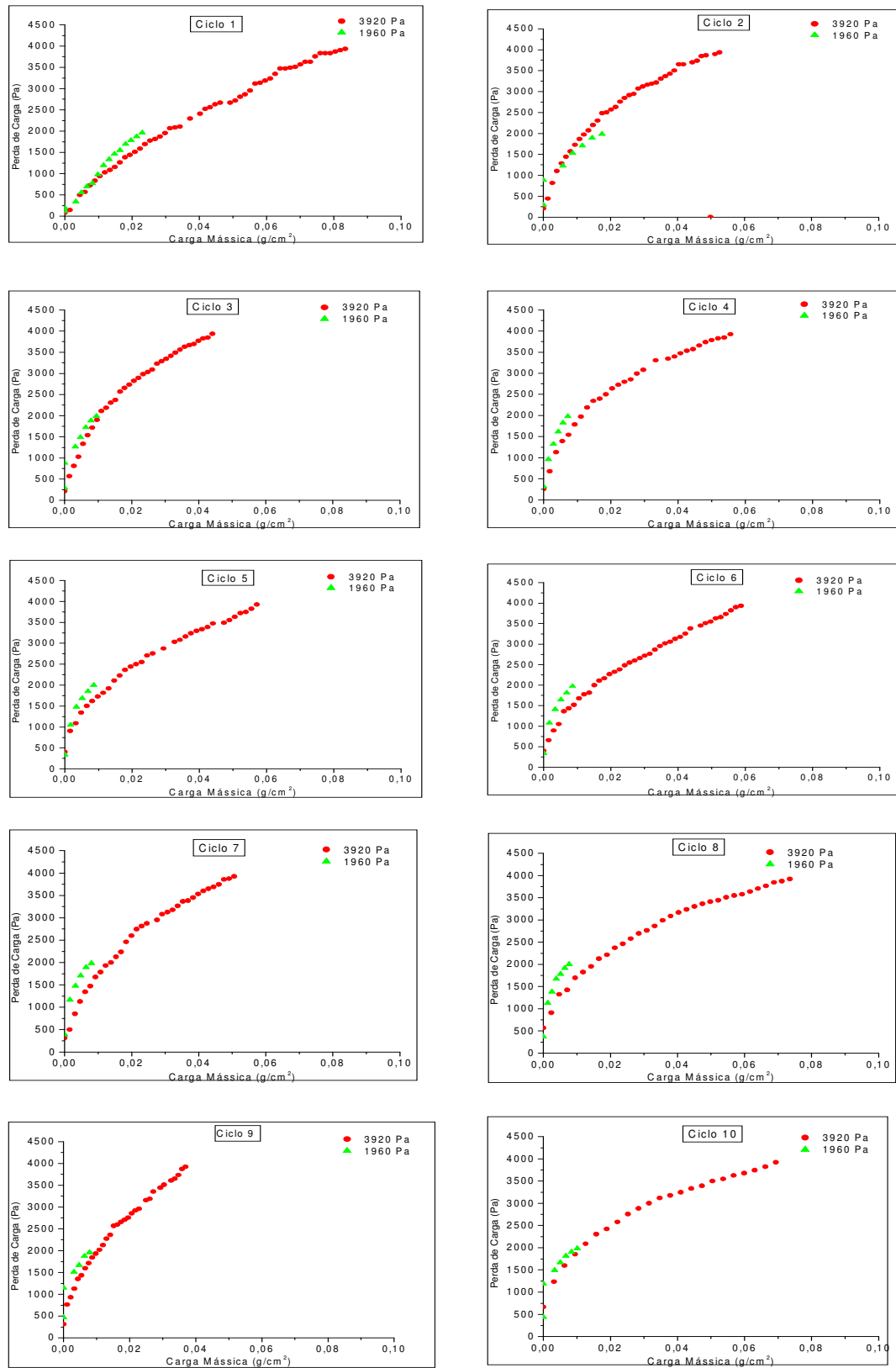


Figura 4.2.2. Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

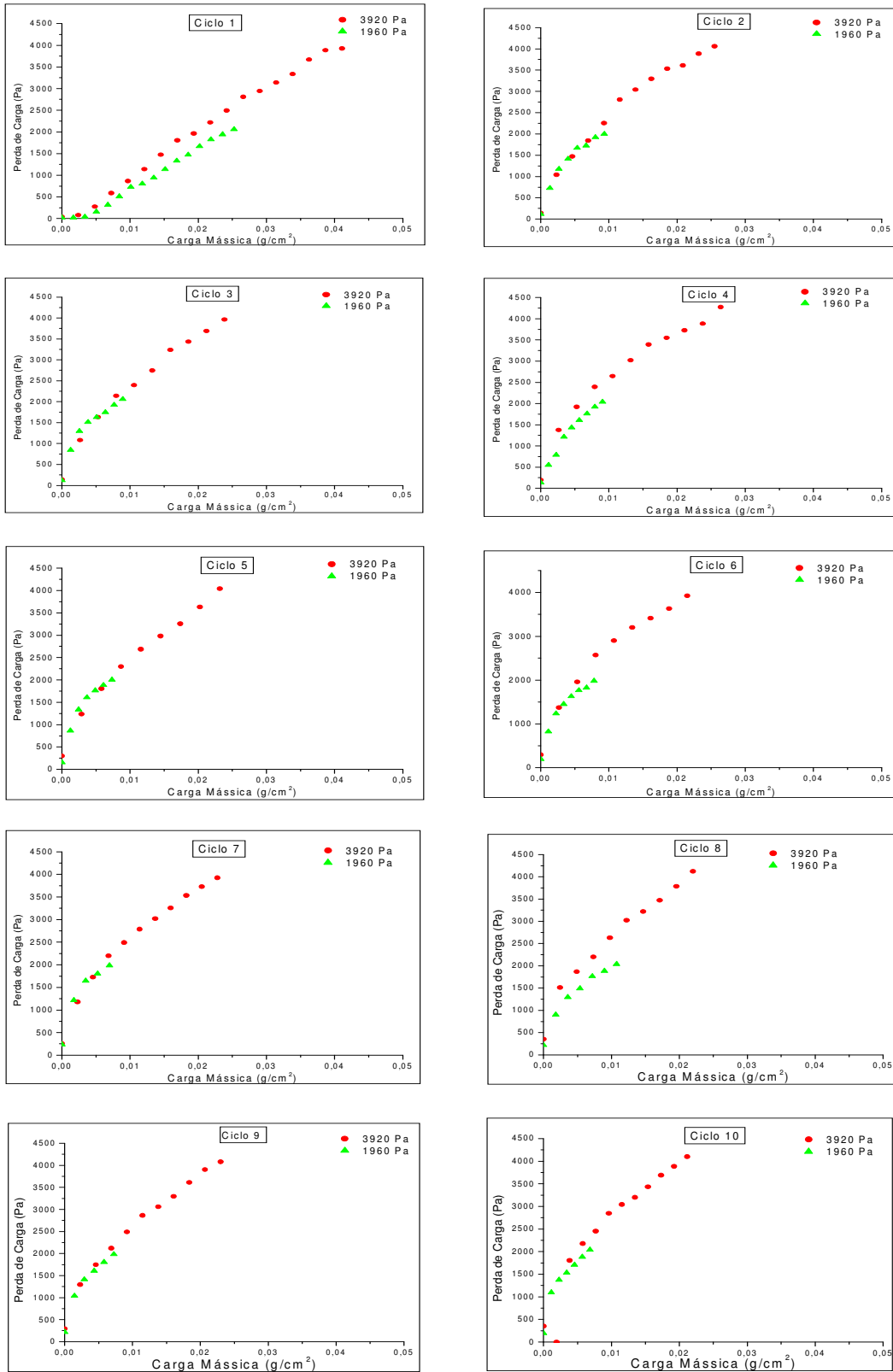


Figura 4.2.3. Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

A Figura 4.2.4 ilustra os valores de massa coletada de pó em cada ciclo de filtração.

Analisando a Figura 4.2.4 nota-se que, como esperado, o aumento na perda de carga máxima teve como consequência uma maior massa coletada em todos os ciclos de filtração, para todos os ensaios. Verifica-se que a massa coletada no primeiro ciclo é bem maior que nos demais e tende a permanecer constante posteriormente, devido à saturação do tecido.

Observa-se também que dobrando o valor da perda de carga máxima, a massa coletada passa a ser de duas a quatro vezes maior, para todos os tecidos estudados, sendo que para tortas finas, obtidas com perda de carga máxima de 1960 Pa, a curva de massa coletada apresentou a mesma tendência de comportamento, independente do tecido.

Analisando as tortas mais espessas, nota-se que o poliéster e o polipropileno apresentaram um comportamento muito parecido entre si e o acrílico obteve valores de duas a três vezes maiores de massa coletada, apresentando um comportamento inconstante, fato anteriormente justificado, no item 4.1, referente a influência da estrutura dos tecidos, onde foi constatado que maiores valores de permeabilidade e maior abertura superficial do tecido proporcionam maior coleta de partículas.

Os valores de massa coletada estão relacionados com a massa retida no tecido após a limpeza. Com o intuito de analisar esse fato foi construída a Figura 4.2.5.

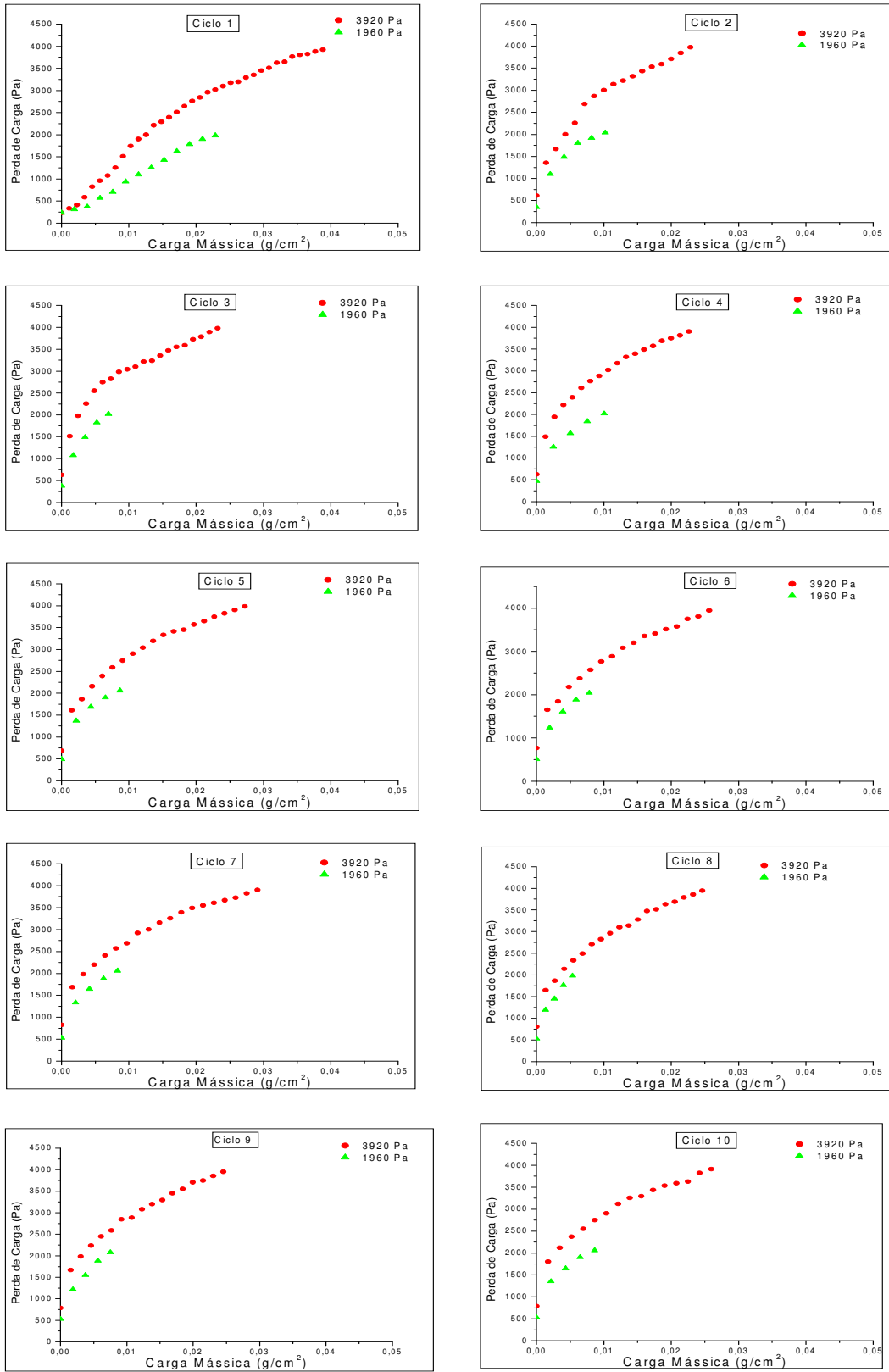


Figura 4.2.3. Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

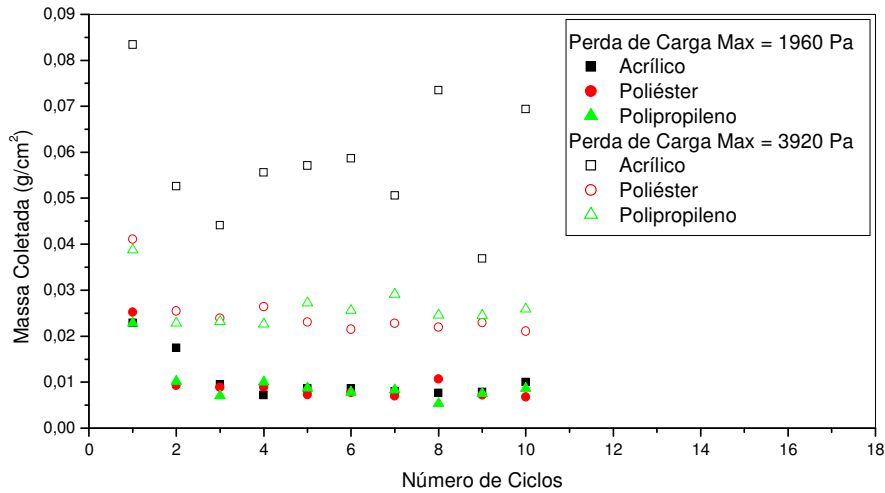


Figura 4.2.4. Massa coletada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

Através da Figura 4.2.5 verifica-se que tortas de diferentes espessuras não tiveram diferenças muito significativas nos valores de massa retida no tecido após a limpeza, exceto para o acrílico. Isso acontece devido à saturação do tecido, ou seja, depois que o tecido atinge sua saturação, toda a massa filtrada é removida pela limpeza, independente do tecido.

O acrílico apresentou um comportamento diferente dos demais meios filtrante, sendo que para tortas finas o tecido atingiu sua saturação apenas no quarto ciclo, no qual sua massa retida passa a ser constante. Já para tortas mais espessas o acrílico apresentou comportamento inconsistente. Este fato pode estar relacionado à sua maior abertura superficial, como pode ser visto na Figura 3.2 e dos valores de permeabilidade e porosidade, Tabela 3.2. A análise da influência da estrutura dos tecidos na formação e remoção de tortas pode ser encontrada no item 4.4.

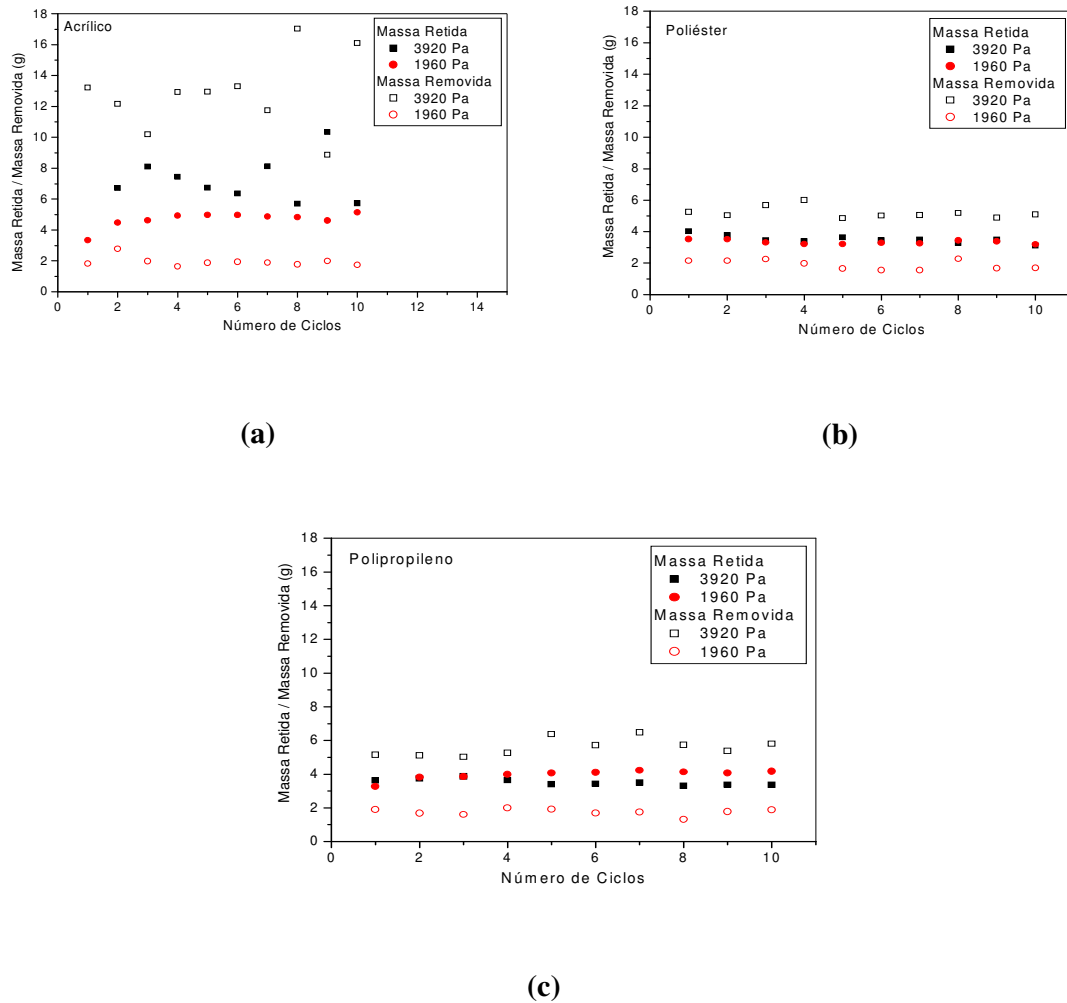


Figura 4.2.5. Massa retida e massa removida após a limpeza em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

Com o intuito de analisar a influência da massa retida na perda de carga residual foi construída a Figura 4.2.6.

Através da análise da Figura 4.2.6 nota-se que, em todos os casos, as tortas mais espessas geraram maiores valores de perda de carga residual, independente dos valores de massa retida nos tecidos após a limpeza.

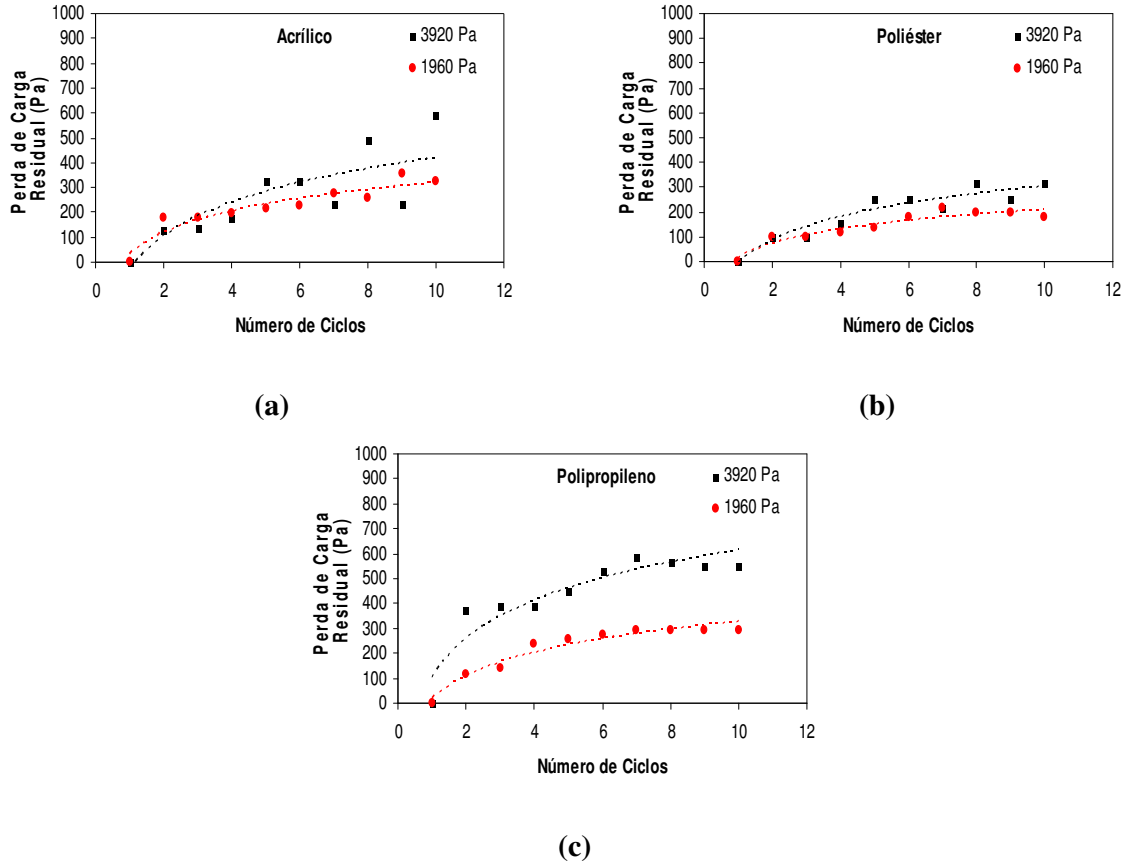


Figura 4.2.6. Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

Análises semelhantes as anteriores foram feitas utilizando o acrílico, o poliéster e o polipropileno como meios filtrante, mantendo as mesmas condições operacionais, velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e de 3920 Pa, no entanto com uma velocidade de limpeza de 15cm/s. As Figuras 4.2.7, 4.2.8 e 4.2.9 ilustram o comportamento de 10 ciclos de filtração e de limpeza nessas condições operacionais para o acrílico, poliéster e polipropileno respectivamente.

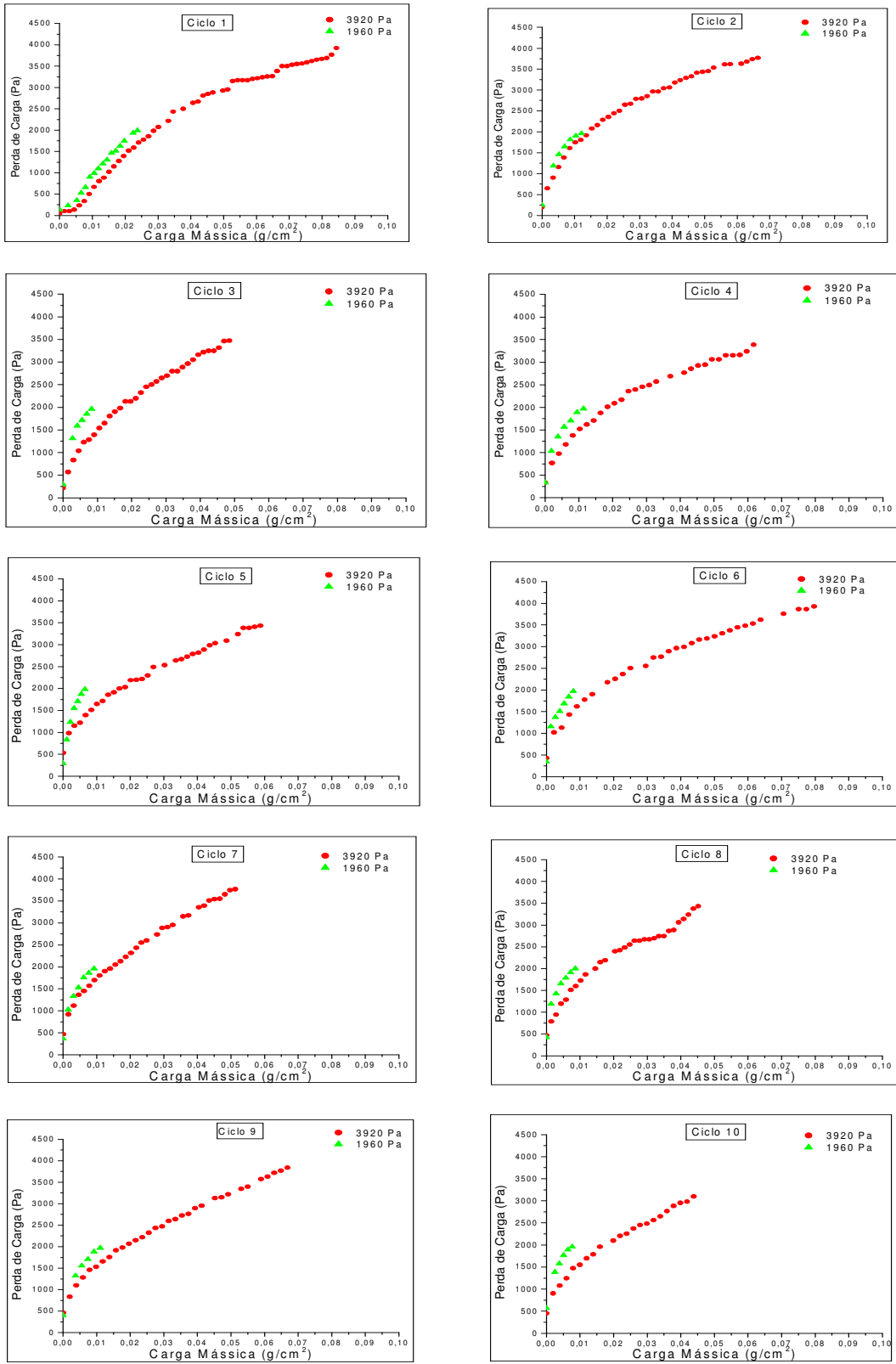


Figura 4.2.7. Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

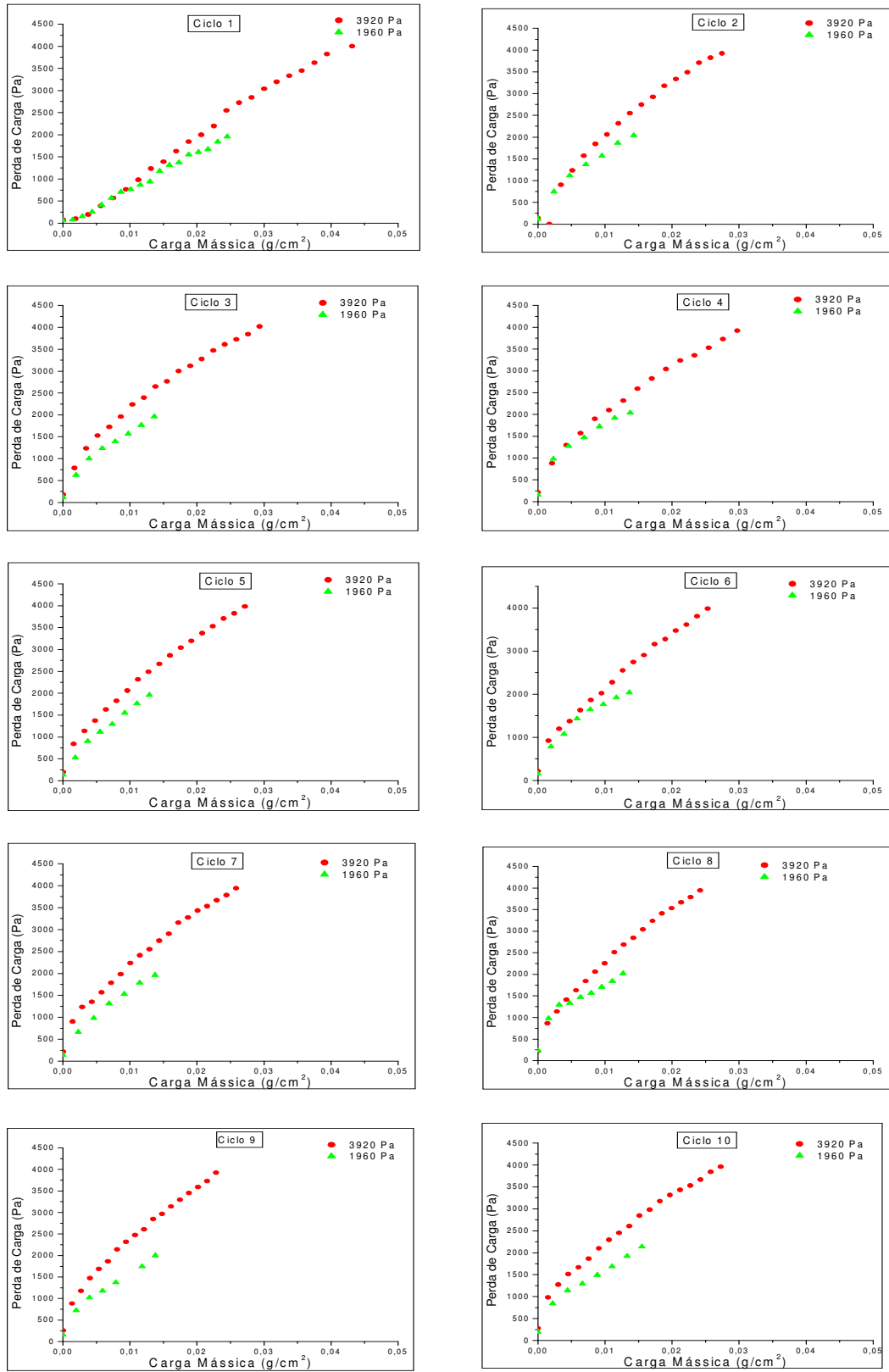


Figura 4.2.8. Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

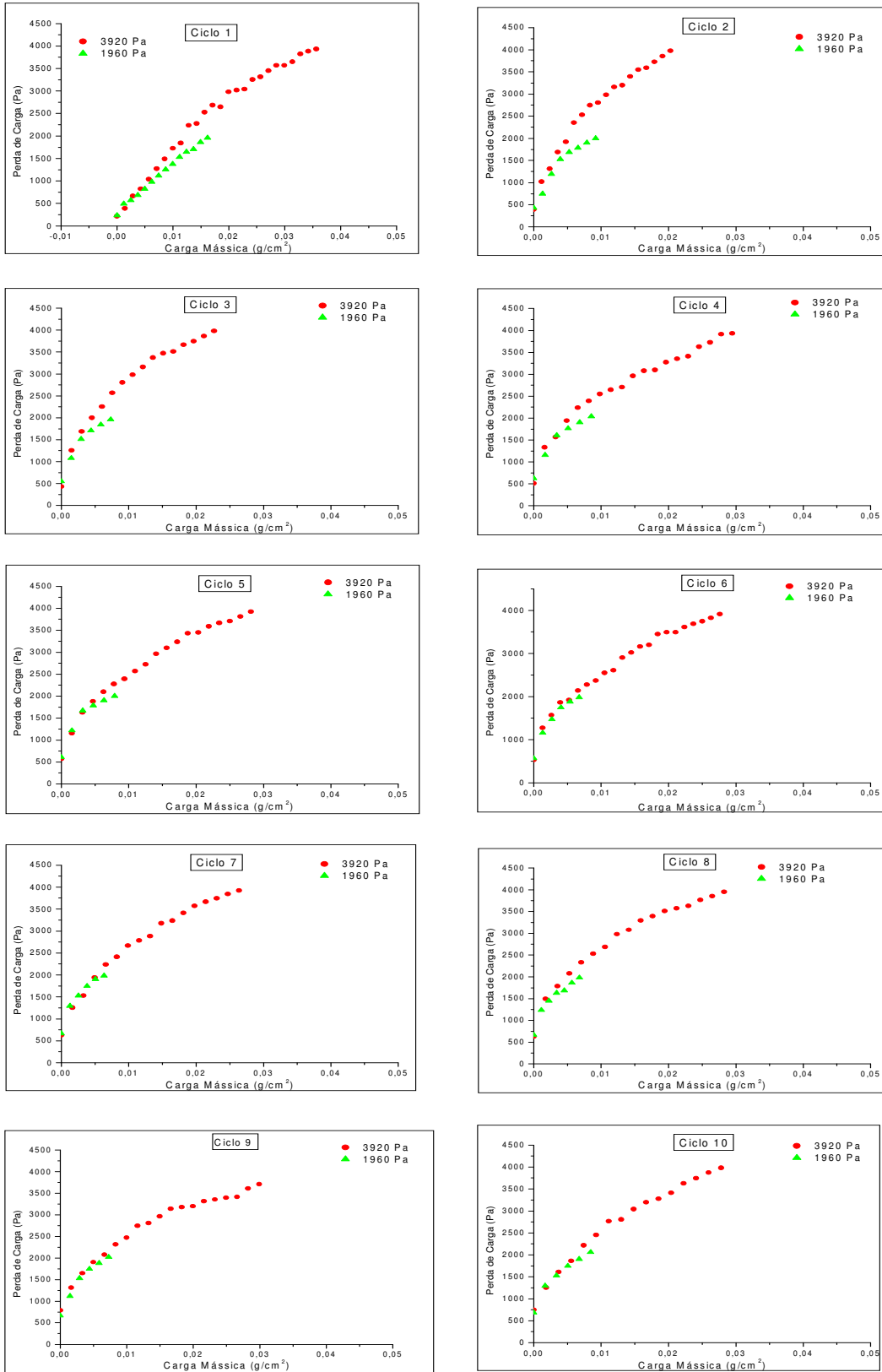


Figura 4.2.9. Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa

Observando as Figuras 4.2.7 a 4.2.9 nota-se que o comportamento de filtração foi semelhante ao comportamento obtido com velocidade de limpeza de 10 cm/s. A análise da influência da velocidade de limpeza esta apresentada no item 4.3.

A Figura 4.2.10 ilustra o primeiro ciclo de filtração para os diferentes tecidos nessas condições operacionais.

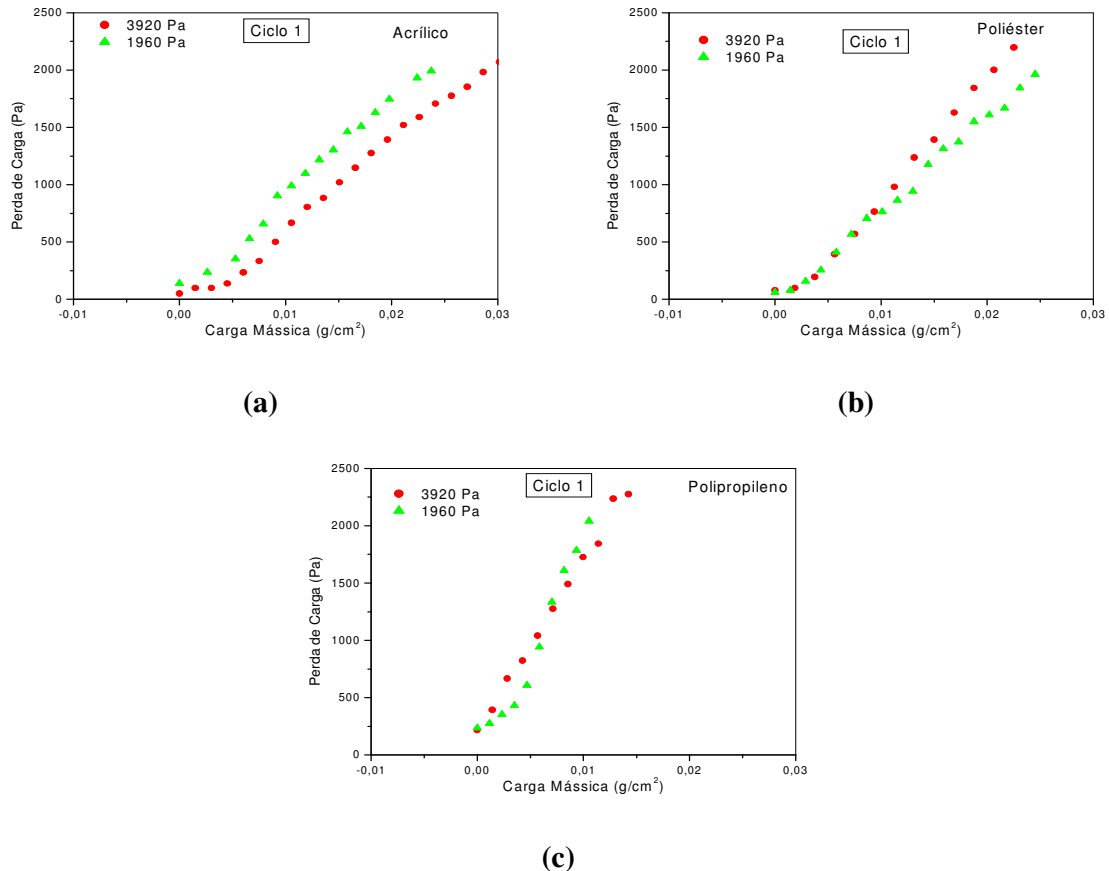


Figura 4.2.10. Primeiro ciclo de filtração com velocidade de filtração igual a 5 cm/s, velocidade de limpeza igual a 15 cm/s. (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

Analisando a Figura 4.2.10 nota-se grande semelhança entre as curvas para diferentes espessuras de tortas, indicando a reprodutibilidade dos dados e cautela na realização dos ensaios, com exceção da Figura 4.2.10(a) que apresentou um desvio de aproximadamente 10% entre as curvas, essa diferença pode ser justificada pelo alto valor de umidade relativa do ar, gerando tortas mais

compactas. A análise do tempo de filtração interna e ponto de colmatção foram feitos no item 4.1, que estuda a influência da estrutura do tecido no processo de filtração e na regeneração do meio filtrante.

Os valores de massa retida e de massa removida para os três meios filtrantes investigados nesse estudo, encontram-se ilustrados na Figura 4.2.11.

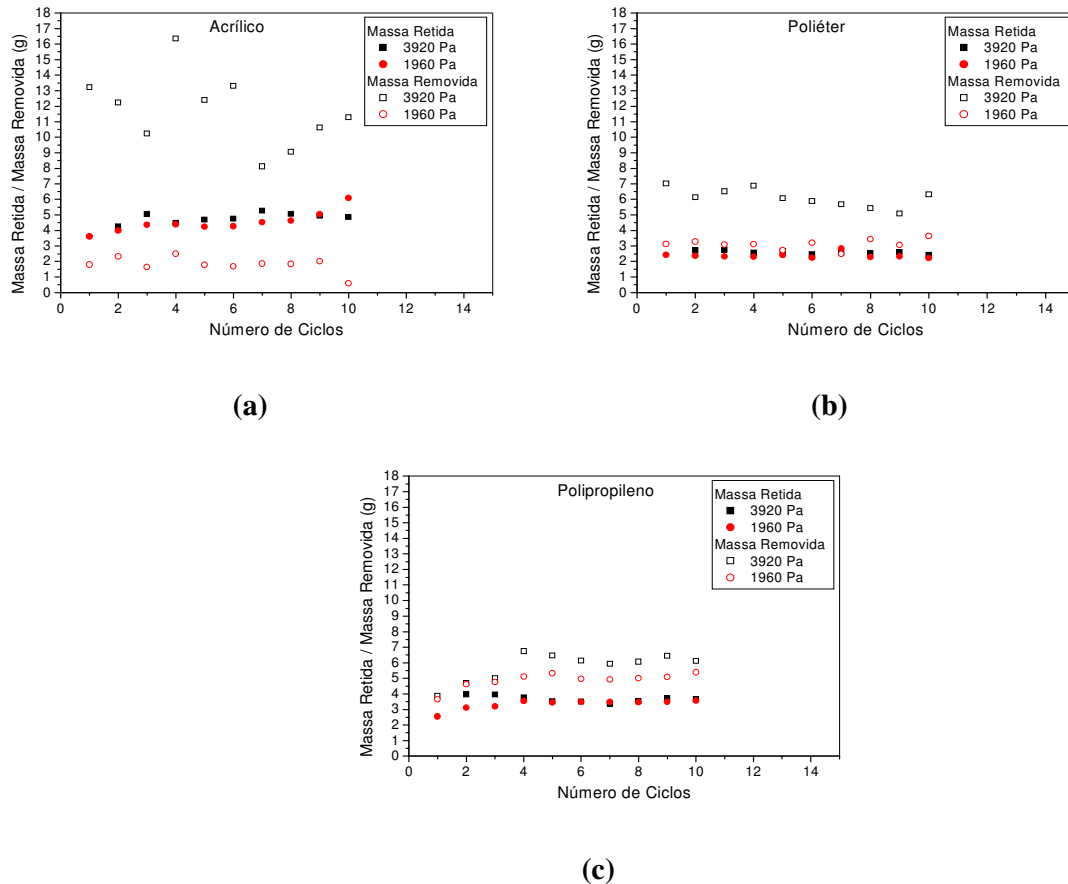


Figura 4.2.11. Massa retida e massa removida após a limpeza em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno.

Observa-se na Figura 4.2.11 que para a velocidade de limpeza de 15 cm/s os três tecidos estudados apresentaram valores de massa retida muito aproximados, para tortas de diferentes espessuras.

Para analisar a influência da massa retida na perda de carga residual, para os três tecidos investigados, foi construída a Figura 4.2.12.

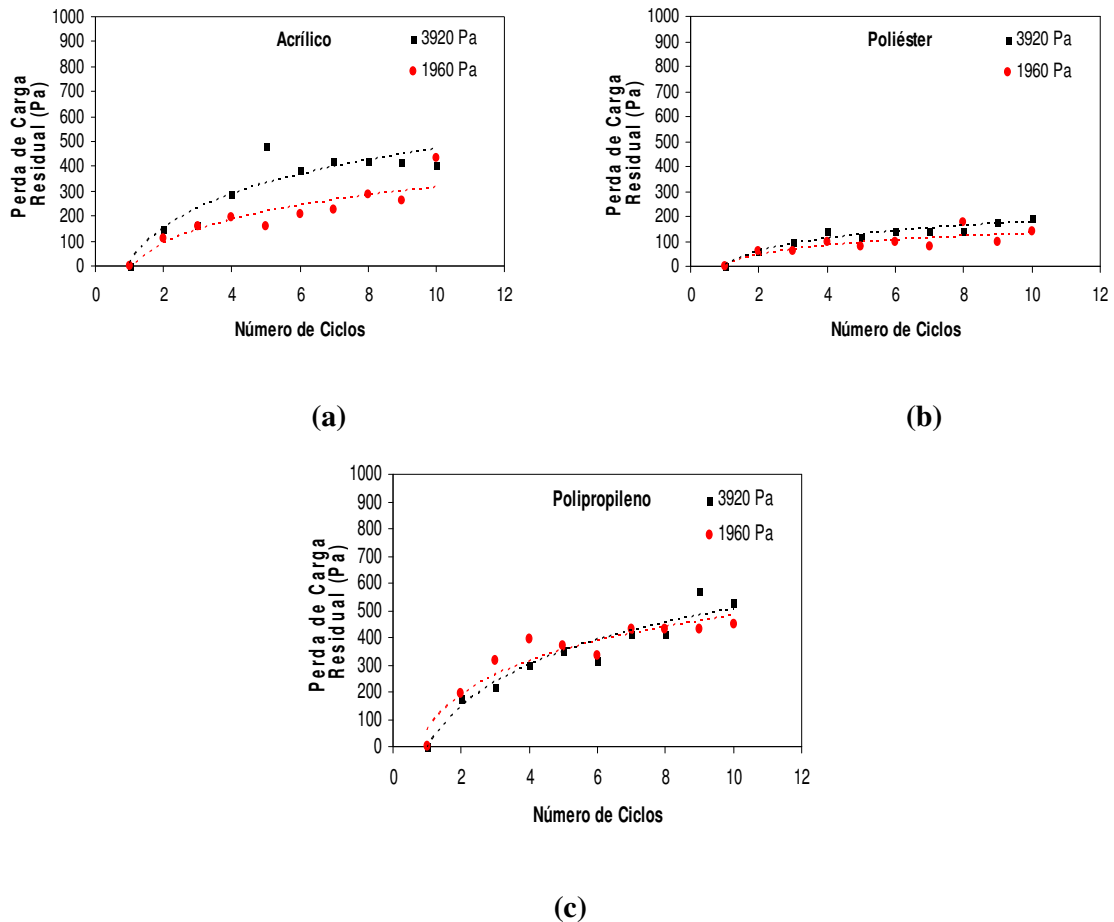


Figura 4.2.12. Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 15 cm/s e perda de carga máxima de 1960 e 3920 Pa, (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

O comportamento de perda de carga residual observado para a velocidade de limpeza de 15 cm/s foi igual ao comportamento para a velocidade de limpeza de 10 cm/s. Observou-se que independentemente da massa retida após a limpeza, tortas mais espessas foram geraram maiores valores de perda de carga residual, exceto para o polipropileno que, nestas condições experimentais apresentou a mesma curva de perda de carga residual para tortas de espessuras diferentes. Rodrigues (2006) constatou que o

aumento na perda de carga máxima admitida resultou em uma maior massa retida e maior perda de carga residual.

Como observado nas Figuras 4.2.5 e 4.2.11, o comportamento de massa retida e de massa removida foi relativamente constante ao longo dos ciclos. A partir da averiguação desse fato foram calculadas as medias dos valores de massa retida, para os dez ciclos de filtração. Foi construída uma tabela de massa retida para diferentes perdas de carga máximas, velocidades de limpeza e diferentes tecidos utilizados nesse trabalho, como mostrado na Tabela 4.2.1.

Tabela 4.2.1 - Massa retida para as diferentes condições operacionais estudadas

Perda de Carga Máxima (Pa)	Acrílico		Poliéster		Polipropileno	
	$V_L=10\text{cm/s}$	$V_L=15\text{cm/s}$	$V_L=10\text{cm/s}$	$V_L=15\text{cm/s}$	$V_L=10\text{cm/s}$	$V_L=15\text{cm/s}$
1960	4,75	4,52	3,36	2,39	4,01	3,33
3920	7,10	4,68	3,52	2,61	3,55	3,75

Através da Tabela 4.2.1 nota-se que, para o acrílico, e velocidade de limpeza de 10 cm/s, a espessura da torta foi importante, porque tortas mais espessas tiveram maiores valores de massa retida. Aumentando a velocidade para 15 cm/s o aumento na massa retida para tortas mais espessas foi menos acentuado. Para o poliéster o aumento da espessura da torta não pareceu influenciar significativamente nos valores de massa retida.

Tieni (2005) estudou a influência da velocidade de limpeza para o poliéster e diferentes perda de carga máxima e observou que para a velocidade de limpeza de 5 cm/s a espessura da torta teve grande influencia nos valores de massa retida após a limpeza, sendo que ocorreu um aumento linear com a perda de carga máxima. Tieni

(2005) observou também que com o aumento da velocidade de limpeza, houve menor variação da massa retida com o aumento da espessura da torta, fato também notado para o acrílico.

Já o polipropileno apresentou um comportamento diferente dos demais tecidos, a velocidade de limpeza maior gerou um valor maior da massa retida para tortas mais espessas.

4.3 Influência da velocidade de limpeza na filtração e regeneração do tecido

Foi realizada análise da influência da velocidade de limpeza no comportamento de formação e remoção de tortas. As Figuras 4.3.1, 4.3.2 e 4.3.3 se referem a 10 ciclos de filtração e limpeza utilizando o acrílico, o poliéster e o polipropileno como meios filtrantes, respectivamente, para uma velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s.

Nota-se que no primeiro ciclo para todos os tecidos as curvas foram muito semelhantes, indicando a reprodutibilidade dos ensaios. A partir do segundo ciclo as curvas passam a se diferenciar devido à influência da velocidade de limpeza, onde começam a serem aplicadas.

No entanto, para o acrílico esse distanciamento não foi muito significativo. Pode ser observado que, na maioria dos ciclos, a curva de velocidade de limpeza de 10 cm/s foi superior às demais.

As curvas para velocidades de limpeza de 5 e 15 cm/s ficaram bastante aproximadas, mostrando que maiores velocidades de limpeza nem sempre são

responsáveis pela melhor regeneração do tecido. Outro fato observado é que uma menor velocidade de limpeza proporcionou maiores valores de massa coletada.

Como pode ser visto na Figura 4.3.2 a mudança na velocidade de limpeza para o poliéster gerou curvas mais distanciadas, sendo que as velocidades de limpeza de 10 e de 15 cm/s geraram curvas semelhantes, com menores valores de perda de carga para a mesma carga mássica..

Observando a Figura 4.3.3 nota-se que para o polipropileno o aumento da velocidade de limpeza de 5 para 10 cm/s acarretou numa melhor regeneração do tecido, indicado pelo distanciamento da curva de velocidade de limpeza de 5 cm/s em relação as demais, que apresentaram maiores valores de carga mássica para o valor pré-estabelecido de perda de carga máxima. As curvas de velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s permaneceram próximas, indicando que o aumento de velocidade de limpeza de 10 para 15 cm/s não causou melhor remoção da torta de filtração.

Comparando a Figura 4.3.1 com a 4.3.2 e 4.3.3, nota-se que para o poliéster a mudança na velocidade de limpeza teve uma influência muito maior que para o polipropileno e para o acrílico, fato investigado no item 4.1, referente à estrutura dos tecidos.

A Figura 4.3.4 ilustra a massa retida para diferentes velocidades de limpeza para os tecidos estudados, a fim de investigar a influência da velocidade de limpeza na remoção de partículas do meio filtrante.

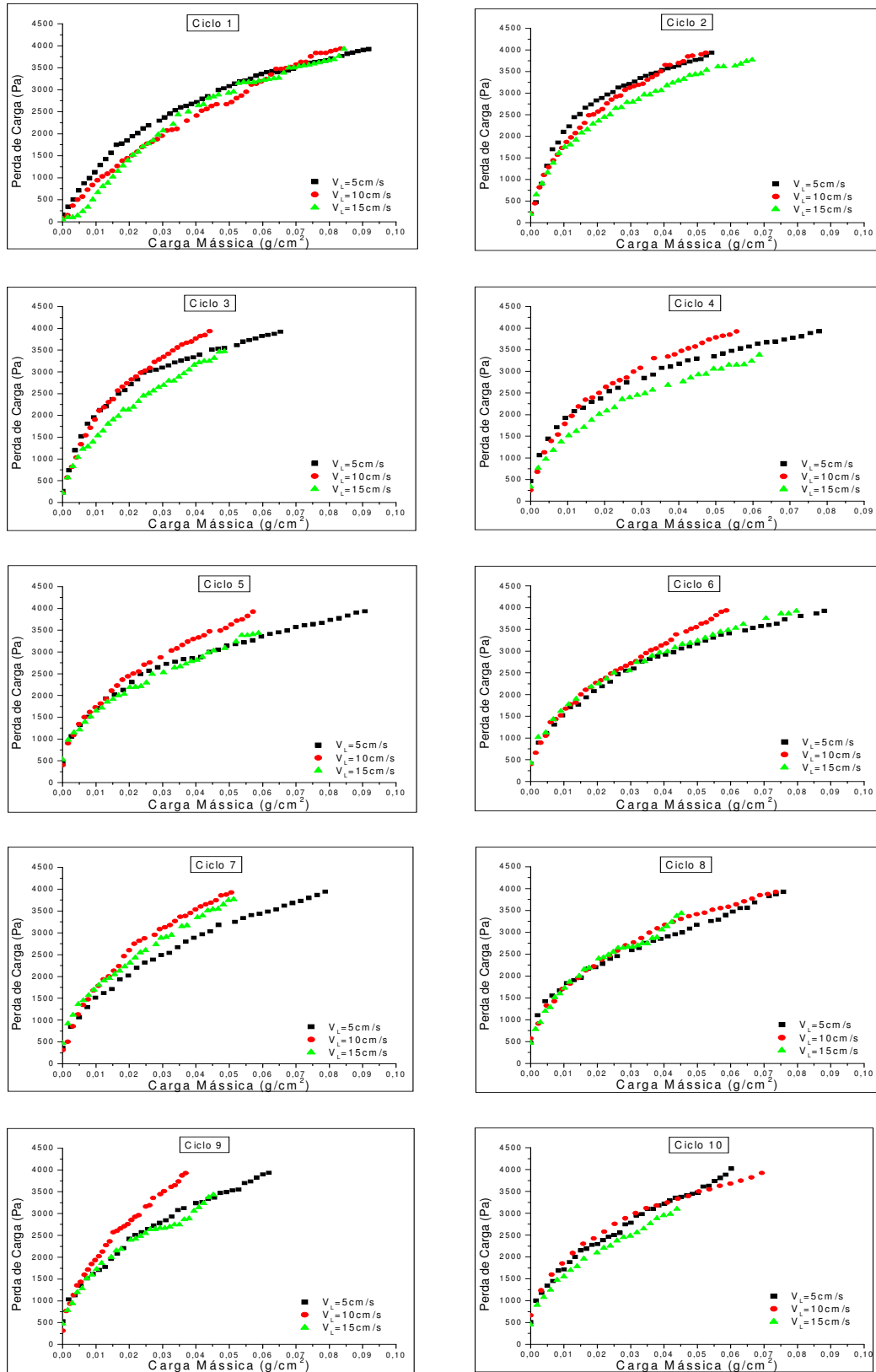


Figura 4.3.1. Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s

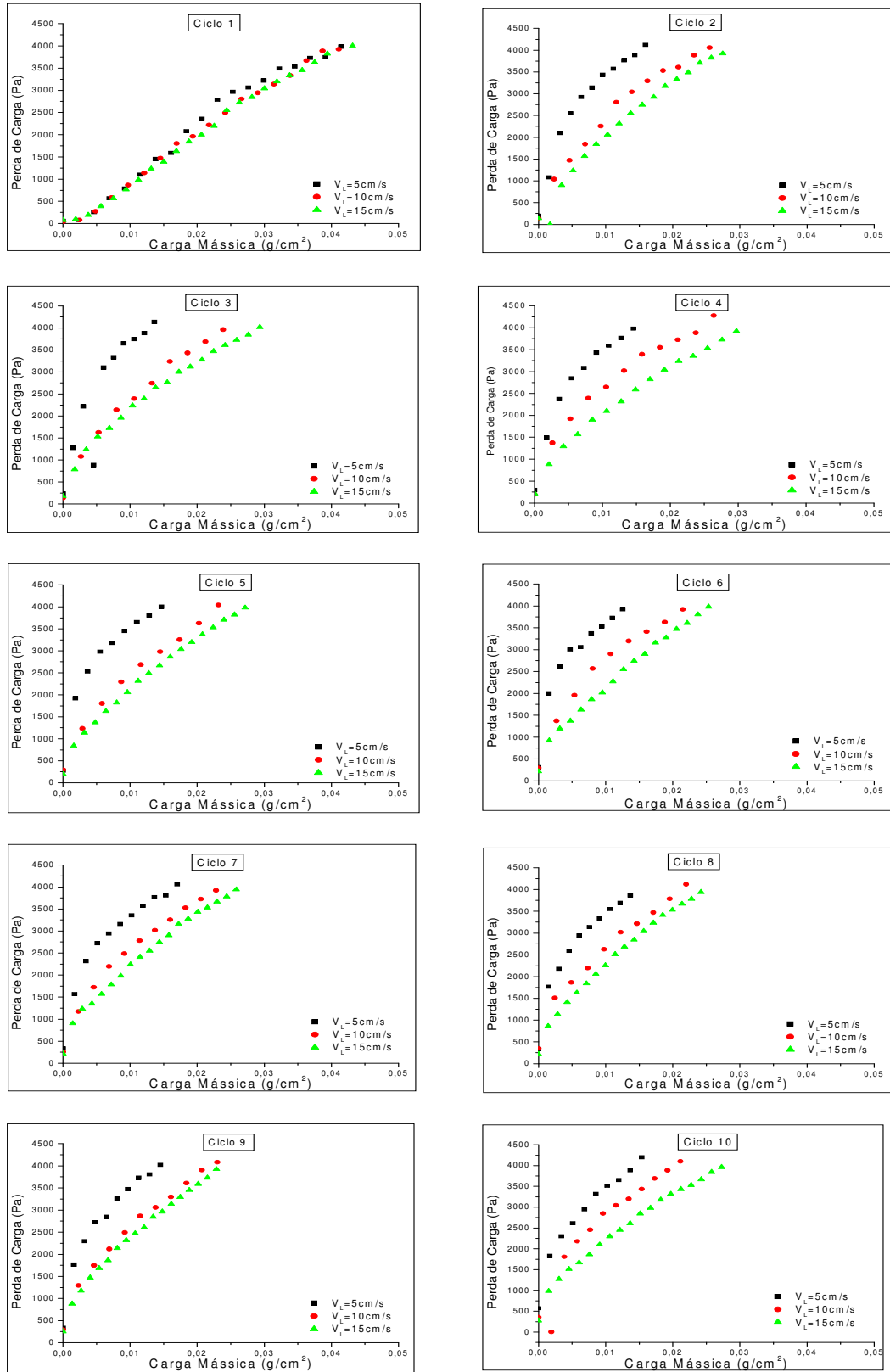


Figura 4.3.2. Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s

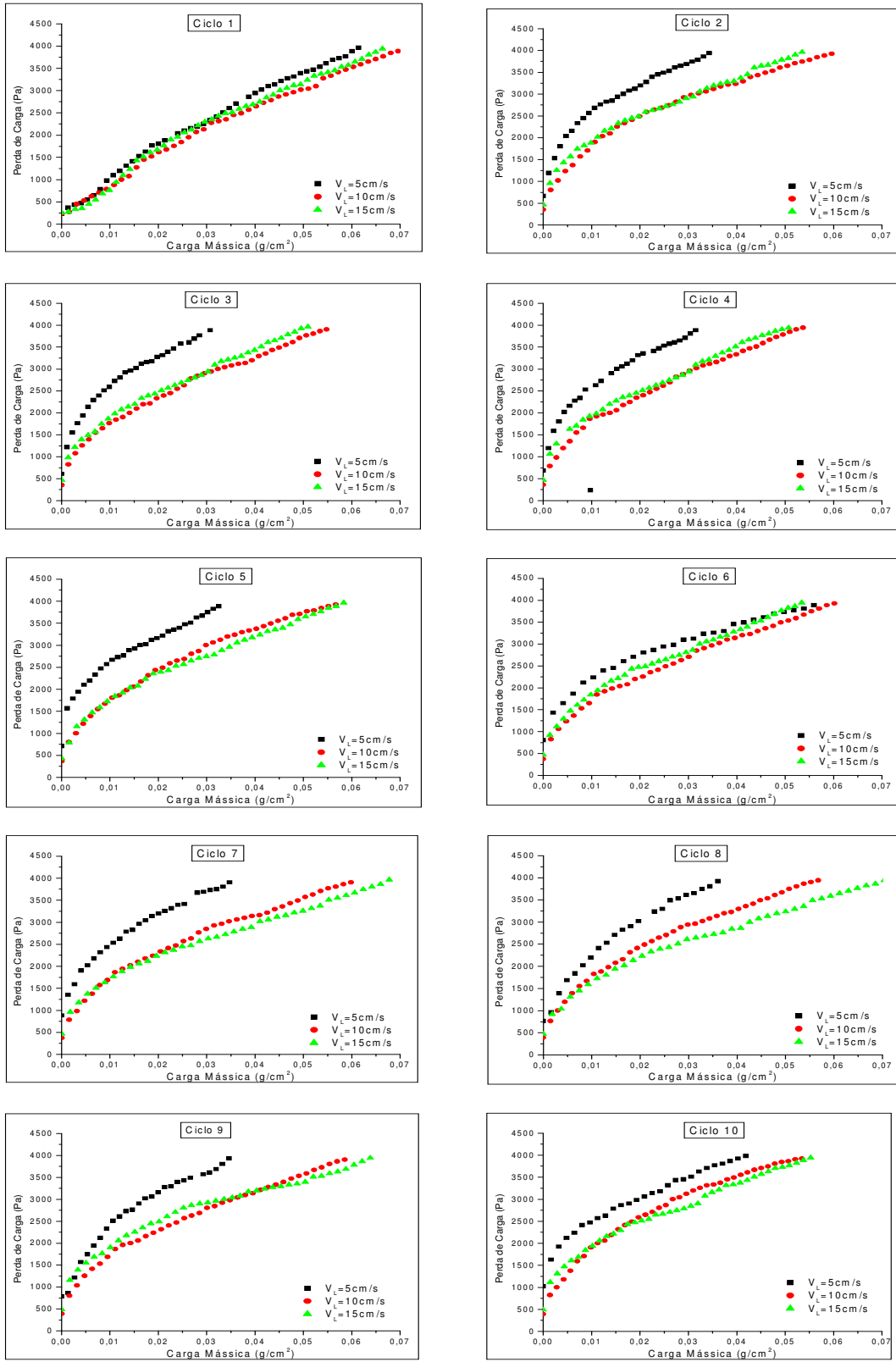


Figura 4.3.3. Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s

Observando a Figura 4.3.4 (a) nota-se um comportamento instável para o acrílico. Analisando a Figura 4.3.4 (b) nota-se que o poliéster apresentou um comportamento estável, onde maiores velocidades de limpeza foram capazes de regenerar melhor o tecido, tendo como consequência uma menor massa retida após a limpeza. Através da Figura 4.3.4 (c) percebe-se que polipropileno apresentou um comportamento semelhante ao comportamento do poliéster, sendo que a maior velocidade de limpeza foi mais eficiente na remoção da torta de filtração, gerando menor quantidade de partículas retidas no tecido após a limpeza.

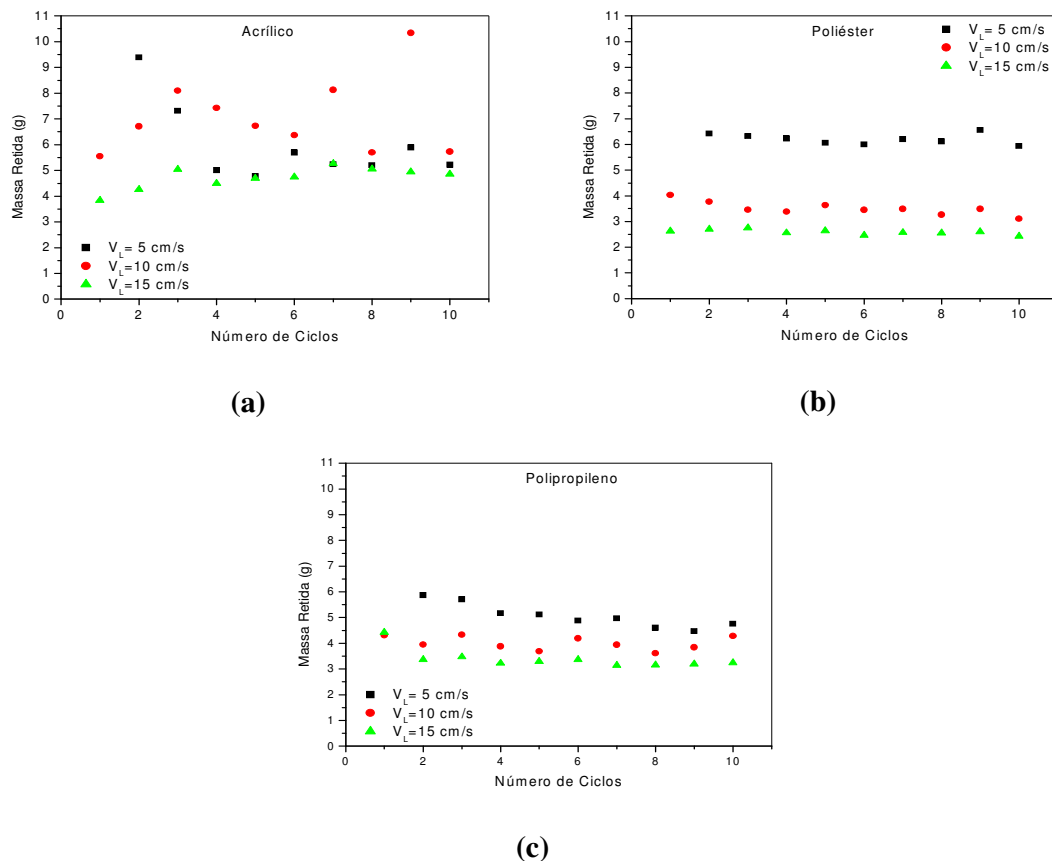


Figura 4.3.4. Massa retida acumulada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e velocidade de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster

Tieni (2005) estudou a influência da velocidade de limpeza utilizando o poliéster como meio filtrante. As velocidades utilizadas foram de 5, 10, 13 e 16 cm/s, e concluiu que a melhor velocidade de limpeza foi a de 13 cm/s, confirmando o fato que maiores velocidades de limpeza não implicam necessariamente em regeneração mais eficiente do tecido.

Foram construídas curvas de perda de carga residual para essas condições operacionais e encontram-se ilustradas na Figura 4.3.5.

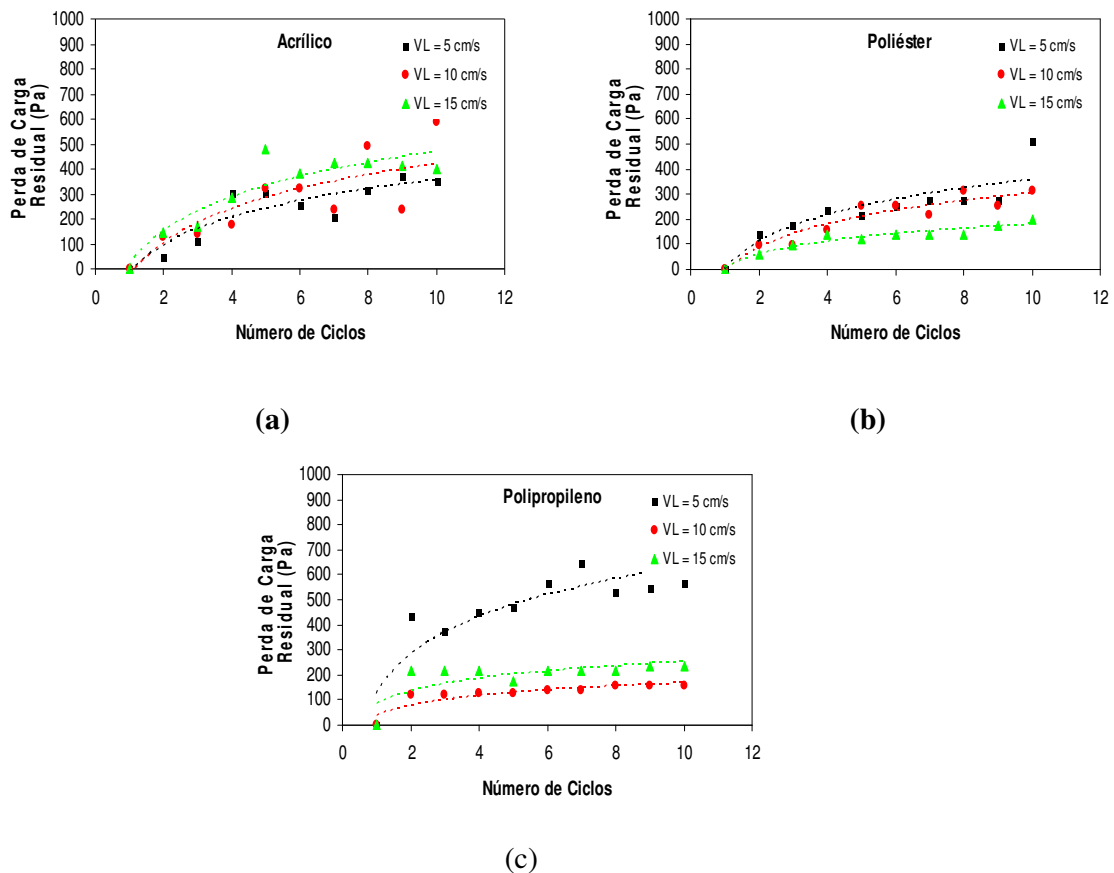


Figura 4.3.5. Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e velocidade de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

Observa-se na Figura 4.3.5 que a velocidade de limpeza influencia nos valores de massa retida no tecido após a limpeza e conseqüentemente também interfere nos valores de perda de carga residual.

Com base nas Figuras 4.3.3 a 4.3.5 verifica-se que, para o acrílico, a velocidade de limpeza que proporcionou melhor regeneração do tecido foi a de 5 cm/s.

Analisando a Figura 4.3.5 (a), (b) e (c) nota-se que, para o acrílico, as curvas de perda da carga residual foram muito aproximadas para as diferentes velocidades de limpeza. Nota-se ainda que, para a velocidade de limpeza maior (15 cm/s), a curva de perda de carga residual foi maior, apesar de ser a velocidade de limpeza que proporcionou a menor retenção de partículas. Este fato pode estar indicando que a massa retida no tecido após a limpeza não seja a única responsável pela perda de carga residual, sendo que pode haver diferença na configuração das partículas retidas que podem influenciar na resistência ao fluxo.

Osório (2006) estudou o comportamento de filtração utilizando filtros de celulose como meio filtrante e também verificou que menores valores de massa retida não implicam necessariamente em menores valores de perda de carga residual.

O poliéster apresentou o comportamento esperado, onde maiores valores de massa retida no filtro após a limpeza levaram a maior perda de carga residual. Nota-se o distanciamento das curvas para diferentes velocidades de limpeza, principalmente para a velocidade mais alta (15 cm/s), que gerou menor curva de perda de carga residual.

Para o polipropileno nota-se que para menor velocidade de limpeza houve maior quantidade de massa retida após a limpeza e maior perda de carga residual. Já para a velocidade de limpeza de 10 cm/s obteve-se uma quantidade intermediária de massa retida, porém, menores valores de perda de carga residual. Indicando, mais uma

vez, que a massa retida no tecido após a limpeza não é a única responsável pela perda de carga residual.

O estudo da influência da velocidade de limpeza também foi realizado para tortas mais finas, obtidas com a perda de carga máxima de 1960 Pa. As Figuras 4.3.6, 4.3.7 e 4.3.8 ilustram 10 ciclos de filtração realizados com a velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 5 e 10 para o acrílico, poliéster e polipropileno, respectivamente.

Para tortas finas utilizando o acrílico como meio filtrante pode ser observado que a diferença entre as curvas de velocidade de filtração foram menores, indicando que para tortas finas o aumento da velocidade de limpeza não representou em um aumento efetivo na remoção da torta.

Tortas finas obtidas com o poliéster como meio filtrante, a exemplo de tortas espessas, apresentaram curvas mais distanciadas para velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s, sendo que a velocidade de limpeza de 15 cm/s mostrou ser mais eficiente, possibilitando uma maior coleta de partículas e valores mais baixos de perda de carga para uma mesma quantidade de partículas coletadas.

Para o polipropileno também se pode notar que o aumento na velocidade de limpeza teve como consequência a diminuição da perda de carga para uma mesma carga mássica, para o mesmo valor de carga mássica, indicando que essa velocidade de limpeza possibilitou melhor regeneração do tecido.

Através da Figura 4.3.9 verifica-se que, para o acrílico e para o poliéster o aumento na velocidade de limpeza de 5 para 10 cm/s não teve influência significativa na massa coletada, indicando que, possivelmente, para tortas finas, o aumento da velocidade de limpeza não oferece melhorias na regeneração desses tecidos.

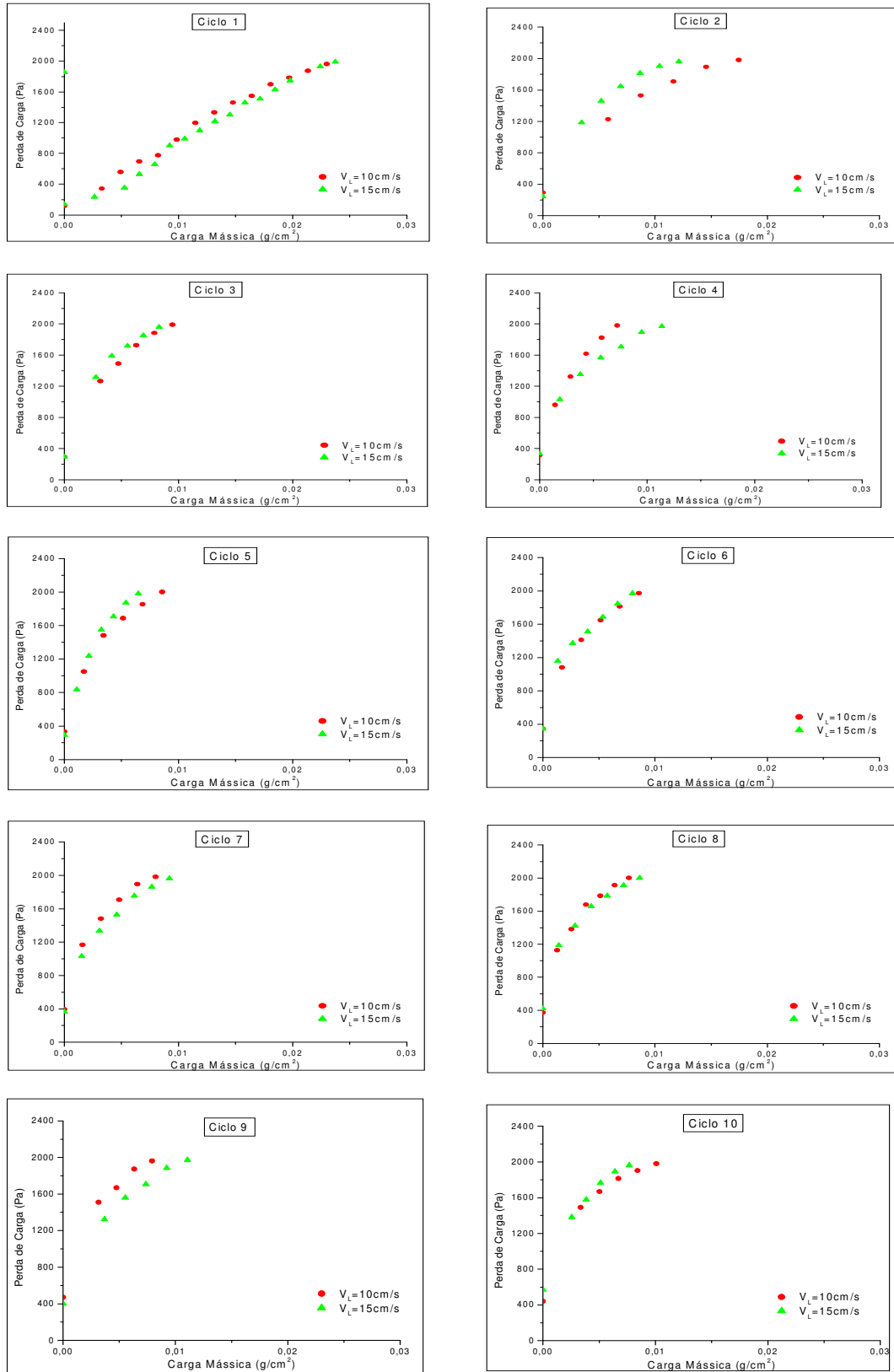


Figura 4.3.6. Ciclos de filtração com o acrílico: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s

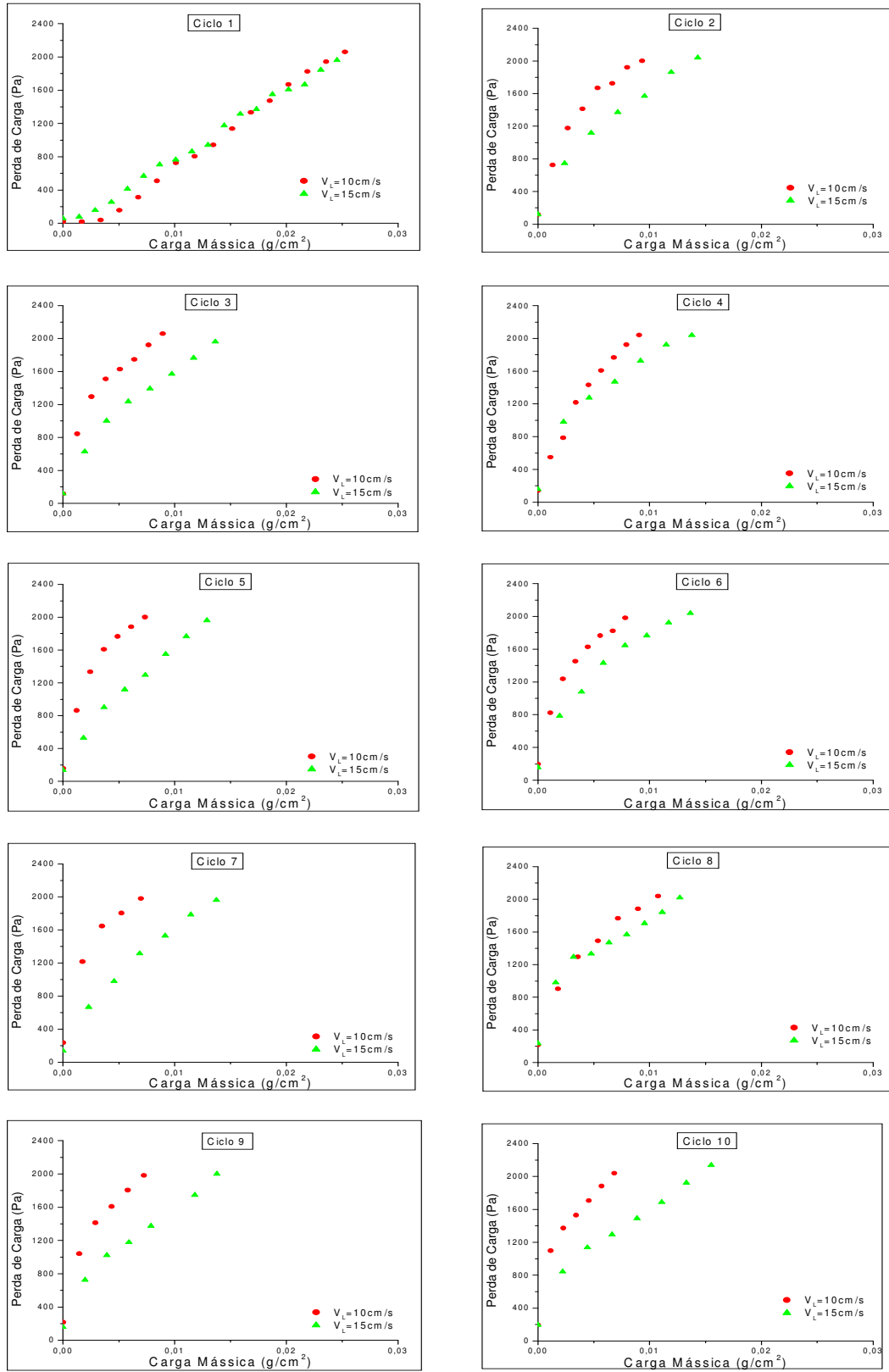


Figura 4.3.7. Ciclos de filtração com o poliéster: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s

Para o polipropileno nota-se que a velocidade de limpeza de 15 cm/s possibilitou uma maior coleta de partículas. A Figura 4.3.10 ilustra a massa retida acumulada para diferentes velocidades de limpeza.

Nota-se através da Figura 4.3.10 e 4.3.4 que para tortas mais finas a influência da velocidade de limpeza na regeneração do meio filtrante é menos evidente. Ainda observando a Figura 4.3.10, nota-se que para o acrílico as diferentes velocidades de limpeza geraram curvas praticamente idênticas de massa retida. Para o poliéster pode-se verificar que a velocidade de limpeza de 10 cm/s foi mais eficiente na regeneração do mesmo, porque gerou menores valores de massa retida após a limpeza. Para o polipropileno essa diferença foi ainda mais acentuada.

Observando a Figura 4.3.11, nota-se que a velocidade de limpeza influenciou de maneira diferente na perda de carga residual para os diferentes tecidos. Para o acrílico as diferentes velocidades de limpeza geraram a mesma perda de carga, para o polipropileno a menor velocidade de limpeza foi mais eficiente, gerando menores valores de perda de carga residual, embora tenha causado uma maior massa retida após a limpeza. Já para o poliéster a maior velocidade de limpeza foi responsável por menores valores de massa retida e menores valores de perda de carga residual.

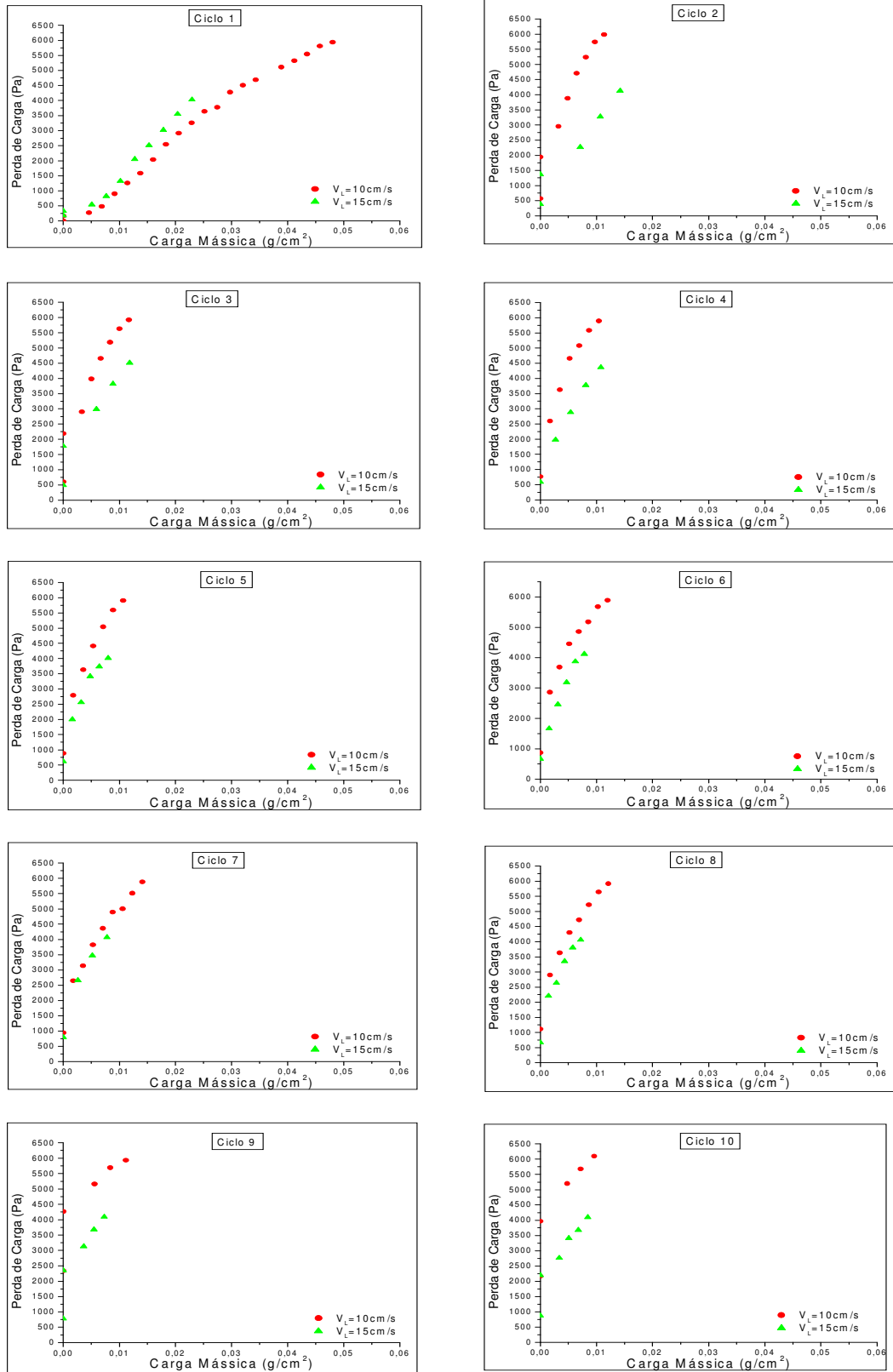


Figura 4.3.8. Ciclos de filtração com o polipropileno: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 e velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s

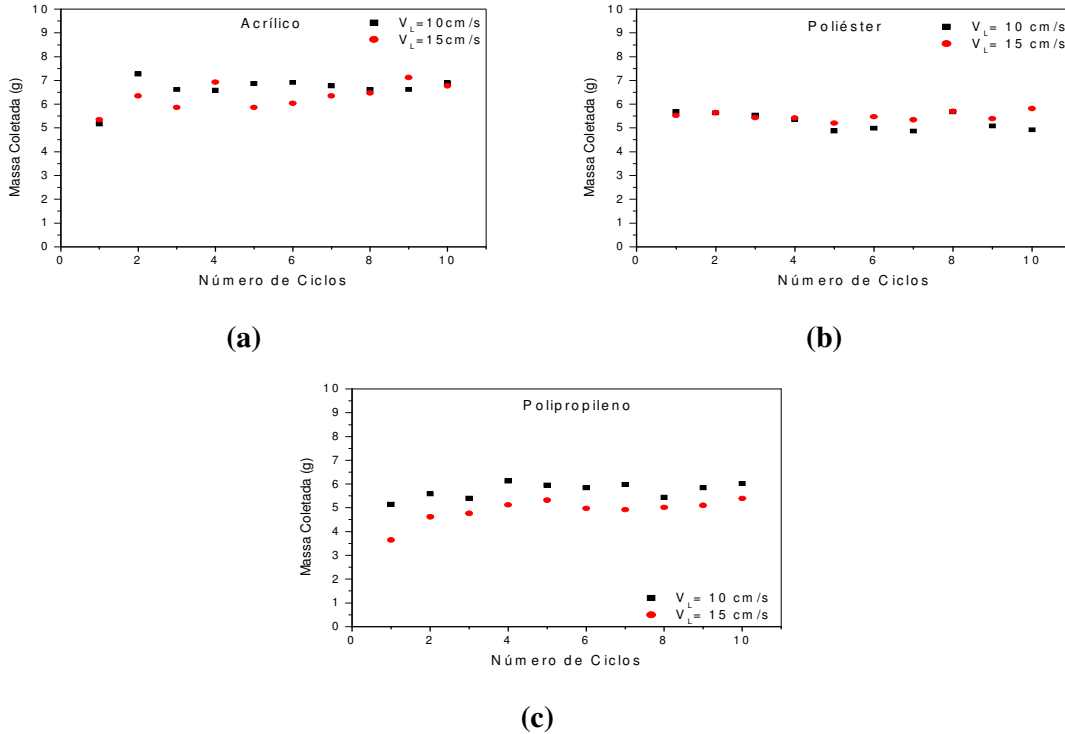


Figura 4.3.9. Massa coletada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

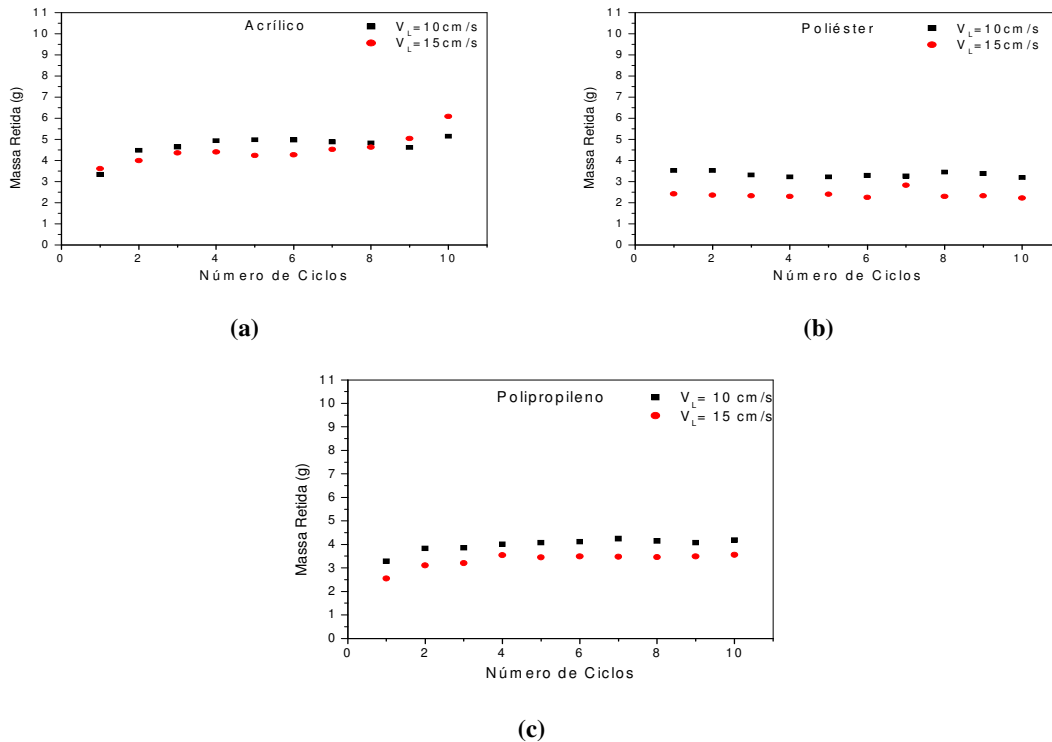


Figura 4.3.10. Massa retida acumulada em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

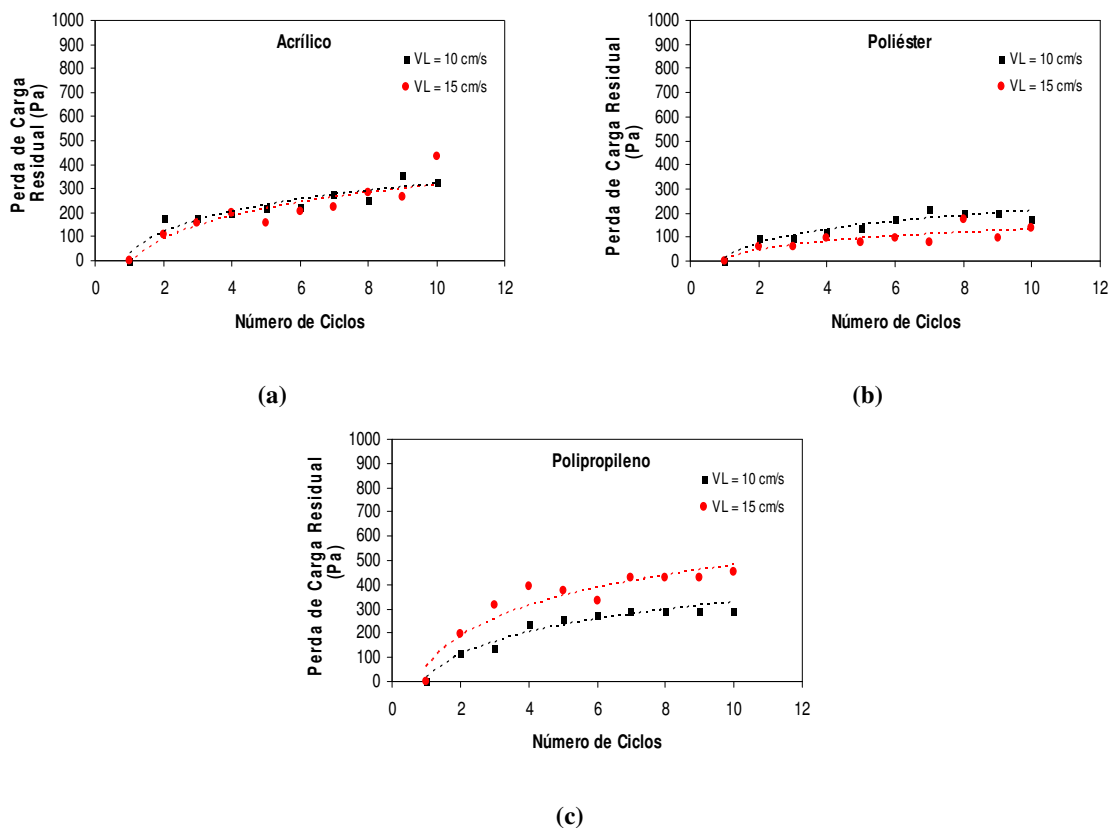


Figura 4.3.11. Perda de carga residual em função do número de ciclos: velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 1960 Pa e velocidade de limpeza de 10 e 15 cm/s: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

4.4 Influência da velocidade de filtração no processo de filtração e regeneração do tecido

Também foram realizadas análises da influência da velocidade de filtração no comportamento de formação e remoção de tortas. A Figura 4.4.1 se refere a 10 ciclos de filtração e limpeza utilizando o acrílico como meio filtrante, para a velocidade de limpeza de 5 cm/s e velocidade de filtração de 5 cm/s, com perda de carga máxima de 1960 Pa, e velocidade de filtração de 10 cm/s, com perda de carga máxima de 5920 Pa.

Foram utilizados valores diferentes de perda de carga máxima, para velocidades de filtração diferentes, com o objetivo de avaliar tortas com a mesma

espessura, eliminando a influência da espessura da torta no processo, possibilitando a análise apenas da influência da velocidade de filtração.

Para isso realizou-se um ciclo de filtração com velocidade de filtração de 5 cm/s e estabeleceu-se o tempo necessário para que a perda de carga máxima de 1960 Pa fosse atingida e obteve-se o valor da massa coletada. Em seguida, realizou-se o experimento com o mesmo tempo do ensaio anterior, para o ciclo de filtração com velocidade de superficial de 10 cm/s, e verificou-se qual foi o valor de perda de carga obtido, ou seja, fixou-se o tempo de filtração. Para conferir se as espessuras das tortas foram iguais comparou-se os valores de massa coletada nos dois ensaios. Para o acrílico a queda de pressão foi de 5920 Pa.

As curvas de 10 ciclos de filtração e limpeza do tecido para essas condições operacionais estão ilustradas na Figura 4.4.1, utilizando-se o acrílico como meio filtrante.

Como pode ser observado na Figura 4.4.1, para uma mesma carga mássica, o aumento da velocidade de filtração gera um grande aumento da queda de pressão durante o processo de filtração. Nota-se que para a maior velocidade de filtração, 10 cm/s, a carga mássica foi um pouco maior, não sendo possível a obtenção de tortas com a mesma espessura. Esse fato foi comprovado pelos maiores valores de massa coletada para a velocidade de filtração de 10 cm/s.

A Figura 4.4.2 ilustra a massa coletada em cada ciclo de filtração para os ensaios com diferentes velocidades de filtração.

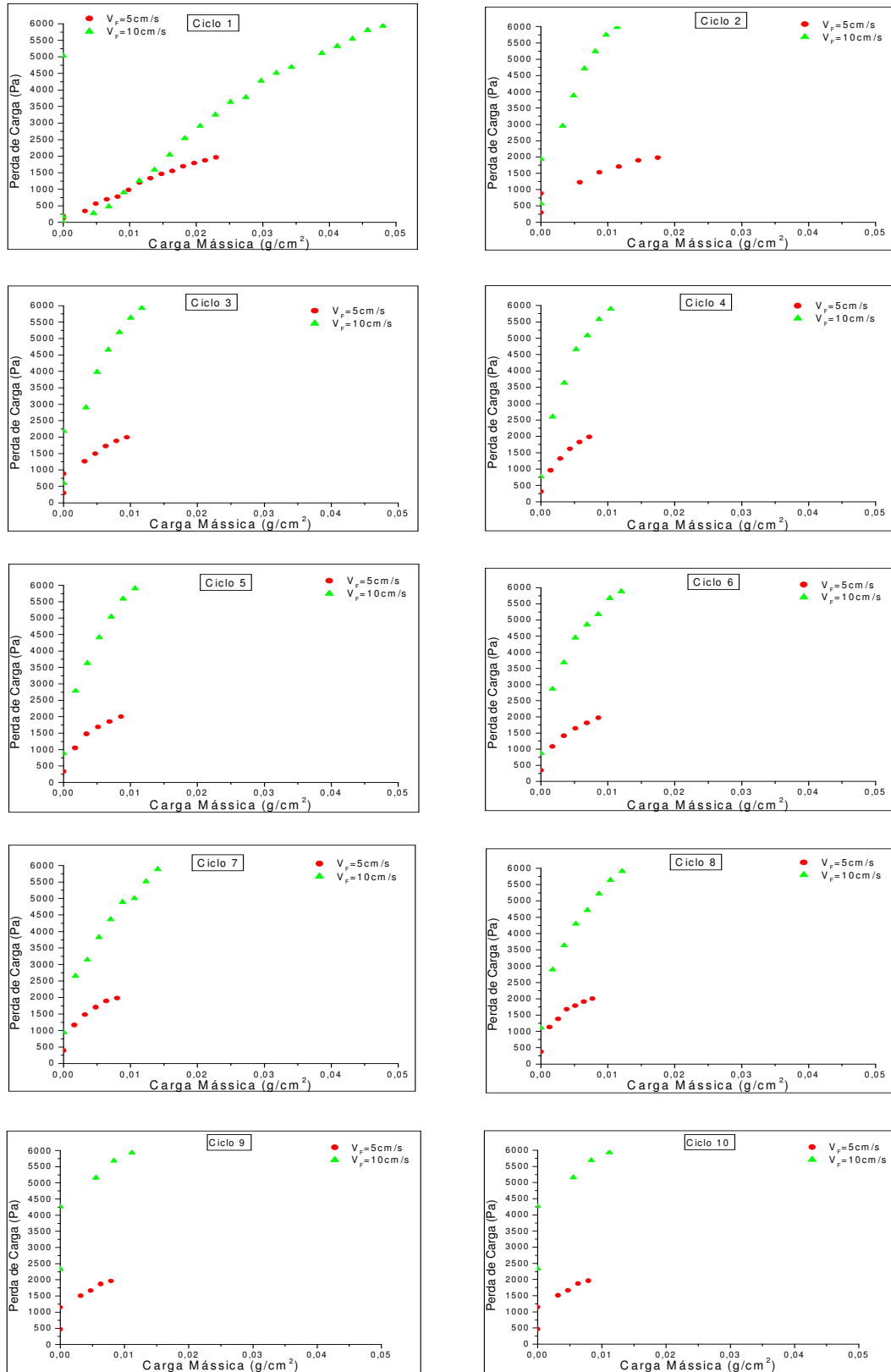


Figura 4.4.1. Ciclos de filtração utilizando o acrílico como meio filtrante, para a velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

Através da Figura 4.4.2 fica claro que as tortas obtidas não foram exatamente da mesma espessura, porque a curva de massa coletada para velocidade de filtração de 10 cm/s foi maior que a curva para velocidade de filtração de 5 cm/s. Esse fato pode ter ocorrido devido a variações na alimentação de pó ou também por erros experimentais na hora de se estabelecer a perda de carga máxima para velocidade de filtração de 10 cm/s.

Apesar dessa diferença ainda foi possível estabelecer a influência da velocidade de filtração na porosidade e resistência específica da torta e também nos valores de massa retida no tecido após a limpeza, perda de carga residual e eficiência de limpeza.

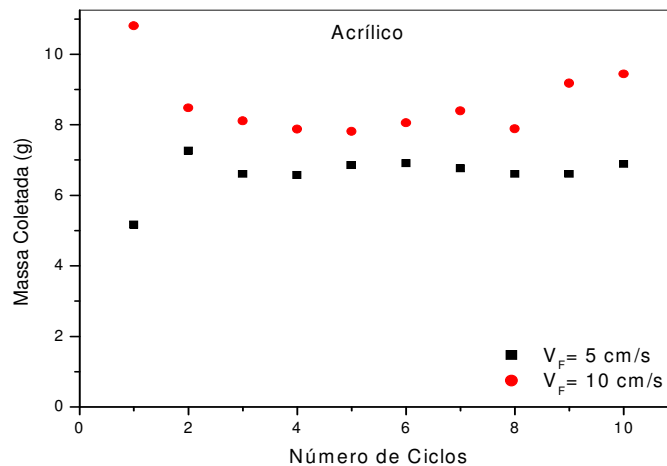


Figura 4.4.2. Massa coletada utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

A ilustração da porosidade e da resistência específica da torta, para velocidade de filtração de 5 e 10 cm/s, encontram-se na Figura 4.4.3.

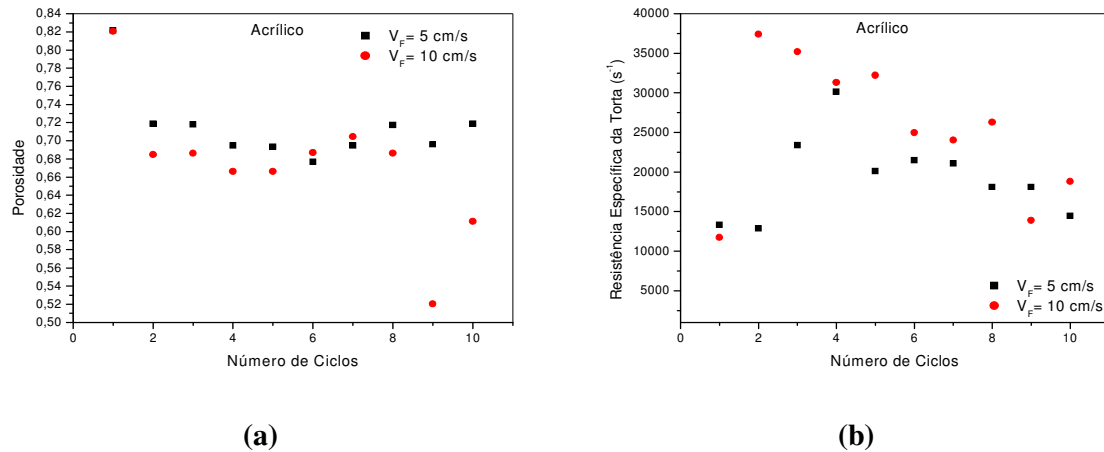


Figura 4.4.3. Características da torta formada utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta

Analisando a Figura 4.4.3 pode-se verificar a influência da velocidade de filtração na porosidade da torta. Fica claro que uma maior velocidade de filtração é responsável pela formação de tortas menos porosas, ou seja, mais compactas, consequentemente, tortas de maior resistência específica. Esses resultados confirmam a constatação de Silva et al. (1999) e de Ito (2002) de que há uma tendência de diminuição na porosidade da torta e de aumento de sua resistência específica conforme se aumenta a velocidade de filtração. Seus dados também mostram que a força de adesão estimada aumenta, e a distância efetiva entre as partículas diminui, com o aumento da velocidade de filtração.

Como dito anteriormente, dados da literatura afirmam que uma maior velocidade superficial de filtração causa maior penetração de partículas, dificultando a remoção da torta, para verificar esse fato foram construídas curvas de massa retida no tecido após a limpeza e de massa de pó removida no processo de limpeza do tecido, como mostra a Figura 4.4.4.

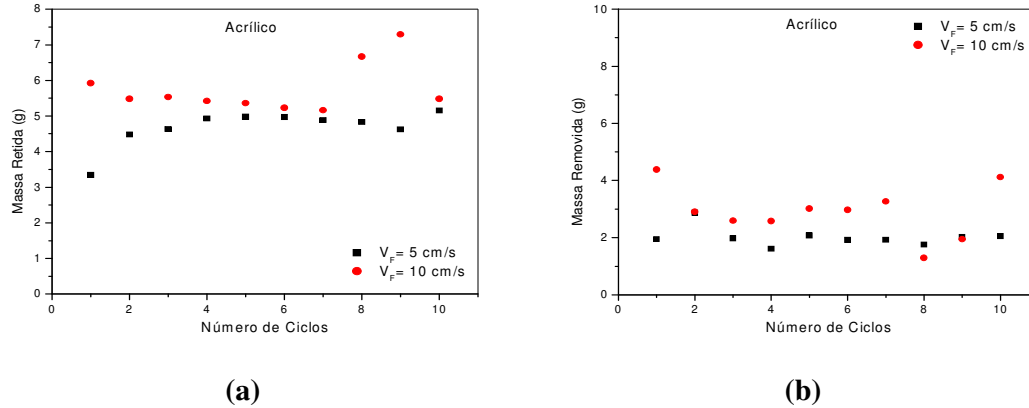


Figura 4.4.4. (a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

Como o esperado, devido a maior penetração de partículas, a maior velocidade de filtração, de 10 cm/s, foi a que gerou maiores valores de massa retida após a limpeza do tecido. Foi também a que gerou maiores valores de massa removida, no entanto isso se deve ao maior valor de massa coletada. Sendo assim, confirma-se o fato de que altos valores de velocidade de filtração dificultam a remoção da torta.

A Figura 4.4.5 ilustra as curvas de perda de carga residual para as diferentes velocidades de filtração.

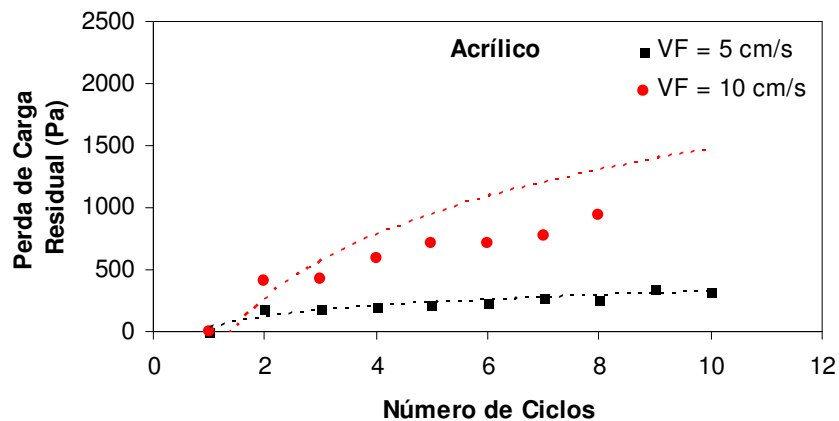


Figura 4.4.5. Perda de carga residual utilizando o acrílico como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

Conforme o esperado, altos valores de velocidade de filtração levaram a maiores valores de queda de pressão residual, ΔP_R provavelmente devido a alta penetração das partículas no tecido, o que dificulta a remoção da torta.

Ensaio semelhantes também foram feitos para verificar a influência da velocidade de filtração utilizando o polipropileno como meio filtrante. Para a velocidade de filtração de 5 cm/s a perda de cara máxima foi 1960 Pa, utilizando o mesmo procedimento que o usado para o acrílico para obter tortas de mesma espessura, chegou-se num valor de perda de carga máxima de 3920 Pa, para a velocidade de filtração de 10 cm/s. Ensaio de 10 ciclos de filtração e regeneração do tecido nessas condições operacionais e velocidade de limpeza de 10 cm/s encontram-se ilustrados na Figura 4.4.6.

Observando a Figura 4.4.6 nota-se que, como para o acrílico, o aumento da velocidade de filtração gerou um grande aumento da queda de pressão durante o processo de filtração. Verifica-se uma proximidade nos valores de carga mássica para as duas velocidades superficiais de filtração, isso implica na formação de tortas com espessuras semelhantes, como o desejado. A Figura 4.4.7 ilustra a massa coletada para os ensaios com diferentes velocidades de filtração.

A ilustração da porosidade e resistência específica da torta para velocidade de filtração de 5 e 10 cm/s encontram-se na Figura 4.4.8. Nota-se através da Figura 4.4.8 que os ensaios realizados com o polipropileno confirmam os resultados obtidos com o acrílico assim como as constatações de Silva et al. (1999) e de Ito (2002) de que há uma tendência de diminuição na porosidade da torta e de aumento de sua resistência específica conforme se aumenta a velocidade de filtração.

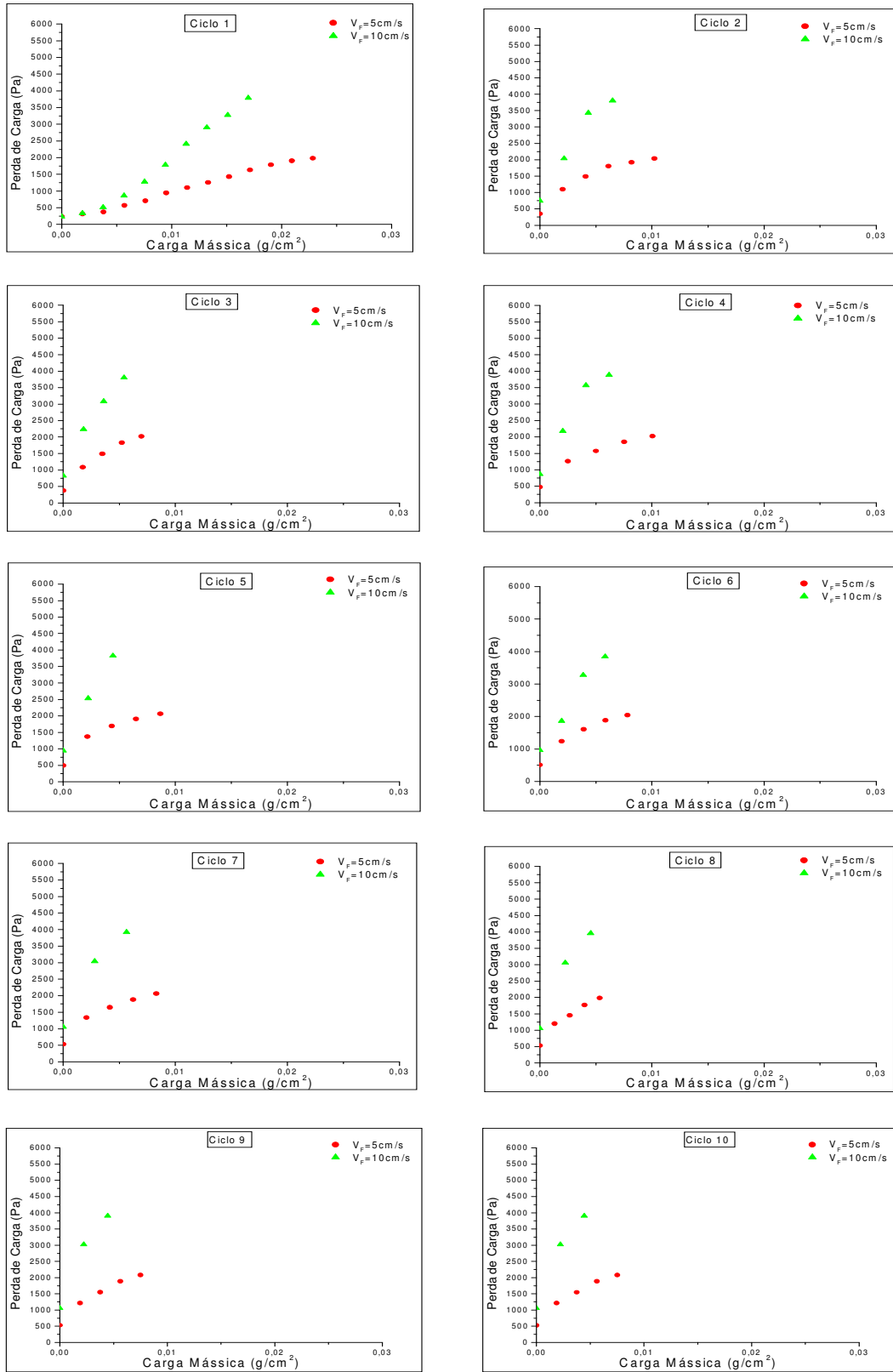


Figura 4.4.6. Ciclos de filtração utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

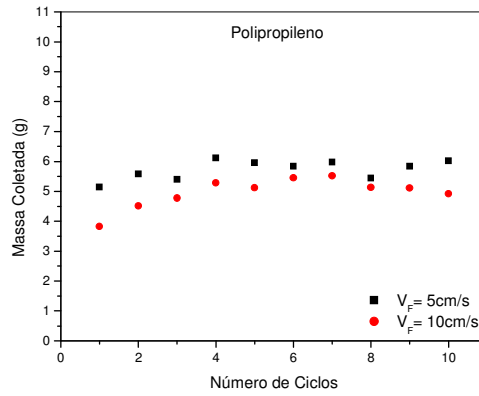


Figura 4.4.7. Massa coletada utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

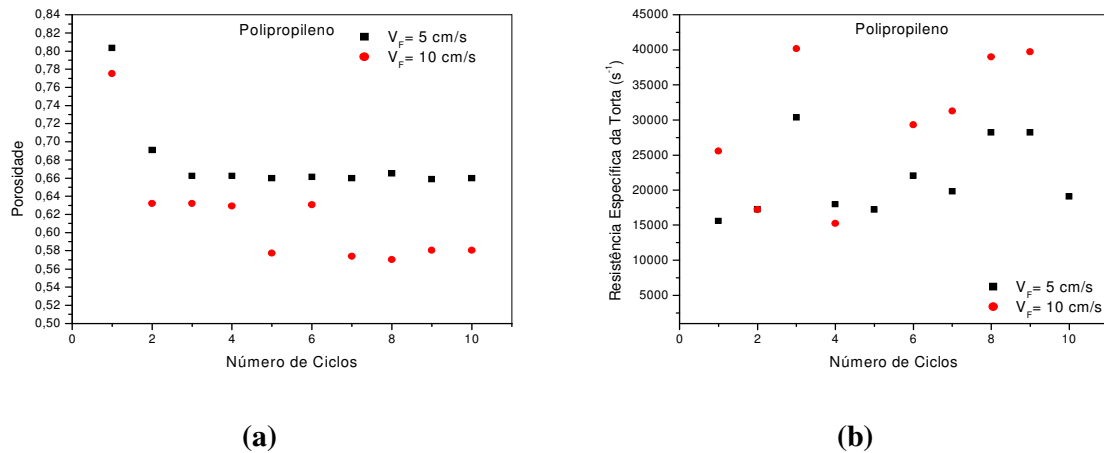


Figura 4.4.8. Características da torta formada utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração. (a) porosidade e (b) resistência específica da torta

A fim de verificar a influencia da velocidade de filtração na remoção da torta foram construídas curvas de massa de torta retida no meio filtrante após a limpeza e de massa despreendida do tecido com a limpeza, ilustrada na Figura 4.4.9.

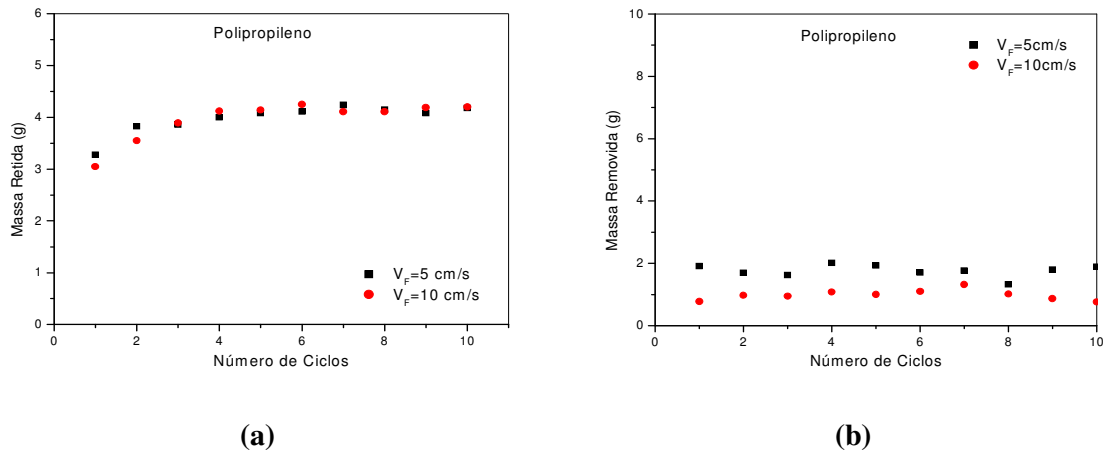


Figura 4.4.9. (a) massa retida acumulada após a limpeza e (b) massa removida durante a limpeza utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

O polipropileno apresentou um comportamento diferente do acrílico, pois as curvas de massa retida para as duas velocidades de filtração foram praticamente idênticas, ou seja, o aumento da velocidade de filtração não ocasionou o aumento da penetração de partículas nesse tecido, conseqüentemente, os valores de massa retida foram os mesmos. Isso se deve a estrutura desse tecido, que possui menor abertura superficial e menores valores de porosidade e permeabilidade, apresentados na Tabela 3.2, o que dificulta a penetração das partículas. O aumento da velocidade de filtração não foi suficiente para aumentar a penetração das partículas no tecido.

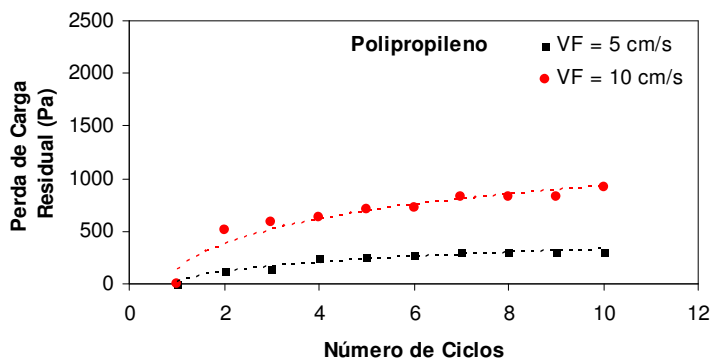


Figura 4.4.10. Perda de carga residual utilizando o polipropileno como meio filtrante, velocidade de limpeza de 10 cm/s, para diferentes velocidades de filtração

Conforme o esperado, altos valores de velocidade de filtração levaram a maiores valores de queda de pressão residual, ΔP_R , independente dos valores de massa retida acumulada no tecido após a limpeza, já que esses valores foram muito semelhantes para as duas velocidades de filtração utilizadas.

4.5 Análise dos *patches* removidos

Como citado anteriormente, a fração de limpeza pode ser feita tanto em termos de massa como em termos de área, pois a torta não é removida inteiramente após a limpeza do tecido, podendo ser observado o fenômeno de *patchy cleaning*, em que há a remoção completa de pedaços de torta, exceto por uma fina camada de pó, e outras áreas permanecem intactas.

A técnica utilizada para marcação de áreas removidas foi desenvolvida por Tieni (2005). A análise das áreas removidas foi feita através do programa Image pro plus, no entanto a área removida era marcada manualmente, já que não houve contraste suficiente detectado pelo software que diferenciava as áreas destacadas e as áreas que permaneciam no tecido automaticamente. Para tortas espessas, formadas com uma perda de carga máxima de 3920 Pa, as áreas removidas foram marcadas para os ciclos 1, 2, 3, 5 e 10. Já para tortas finas, não ficou tão clara a diferença entre as áreas removidas e retidas, piorando ao longo dos ciclos, sendo assim foram marcadas as áreas removidas nos ciclos 1, 2 e 3, gerando resultados mais confiáveis.

4.5.1 Influência da velocidade de limpeza na área total removida para diferentes tecidos

Inicialmente, foram construídas figuras que representam as frações de massa e de área removida, já que ambas são utilizadas para caracterizar a regeneração do meio filtrante. As análises de área removida foram feitas para tortas mais espessas, formadas com uma perda de carga máxima de 3920 Pa, que possibilitou resultados mais precisos e confiáveis.

A Figura 4.5.1 ilustra a comparação entre frações de massa removida para o acrílico, poliéster e para o polipropileno utilizando a velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, com o objetivo de verificar a influência da velocidade de limpeza na área total removida. Para o polipropileno, utilizando a velocidade de limpeza de 15 cm/s não foi possível marcar as áreas removidas nos ciclos 5 e 10 devido a dificuldades no reconhecimento dos *patches*.

A análise da Figura 4.5.1 mostra que há uma pequena diferença entre a fração de massa e a fração de área removida, sendo que os valores de fração mássica removida são um pouco maiores em relação a fração de área removida. Esse fato pode ser explicado porque a área removida é calculada apenas na superfície do tecido e não leva em consideração as partículas que penetraram no tecido durante a filtração e foram removidas com a limpeza do meio filtrante. A fração mássica, como é calculada pela razão de massa desprendida do tecido na limpeza pela massa total do filtro antes da limpeza, considera a massa total desprendida do tecido, inclusive no interior do tecido. No entanto os valores foram próximos, e comportamento da fração de massa removida

foi praticamente idêntico ao comportamento da fração de área removida, comprovando a eficiência do método utilizado para a marcação e contagem dos *patches*.

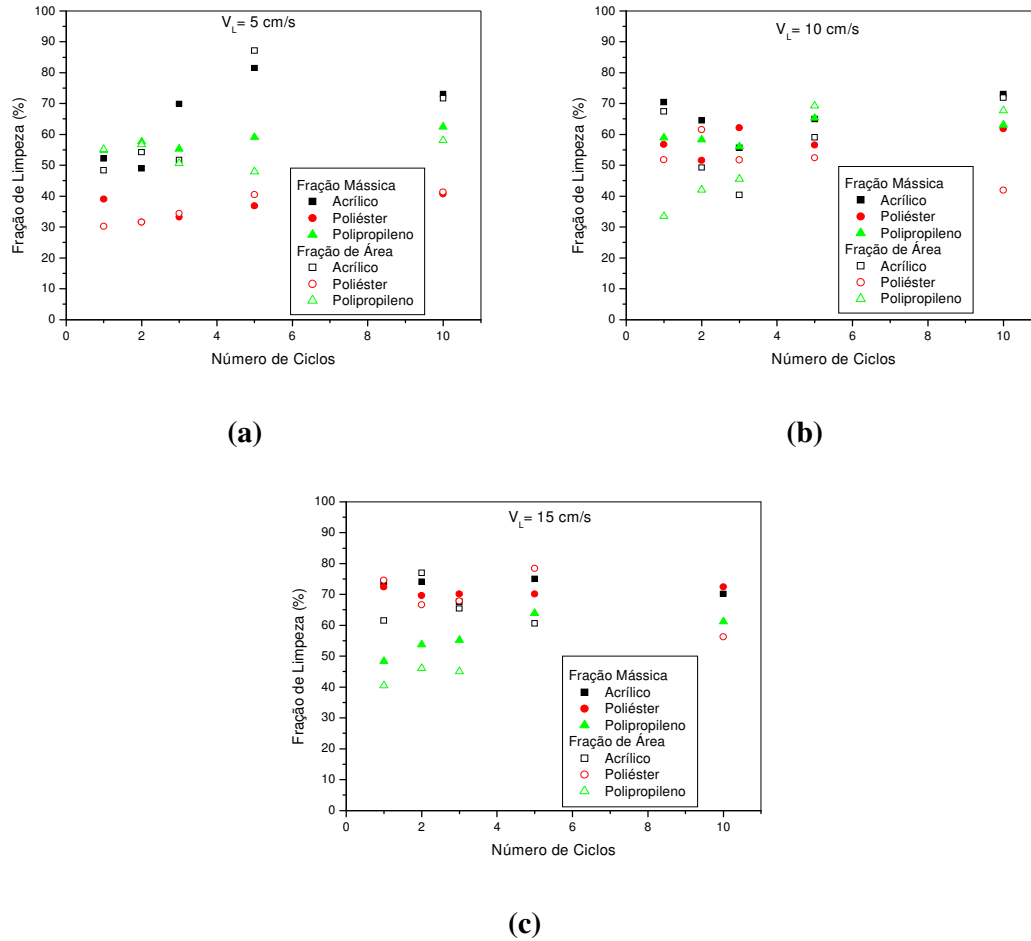


Figura 4.5.1. Comparação entre as frações de limpeza para uma perda de carga máxima de 3920 Pa, para acrílico, poliéster e polipropileno e diferentes velocidades de limpeza

A Figura 4.5.2 ilustra a influência da velocidade de limpeza na área total removida utilizando o acrílico, poliéster e polipropileno como meios filtrantes, nos ciclos 1, 2, 3, 5 e 10, ciclos que tiveram suas áreas removidas marcadas.

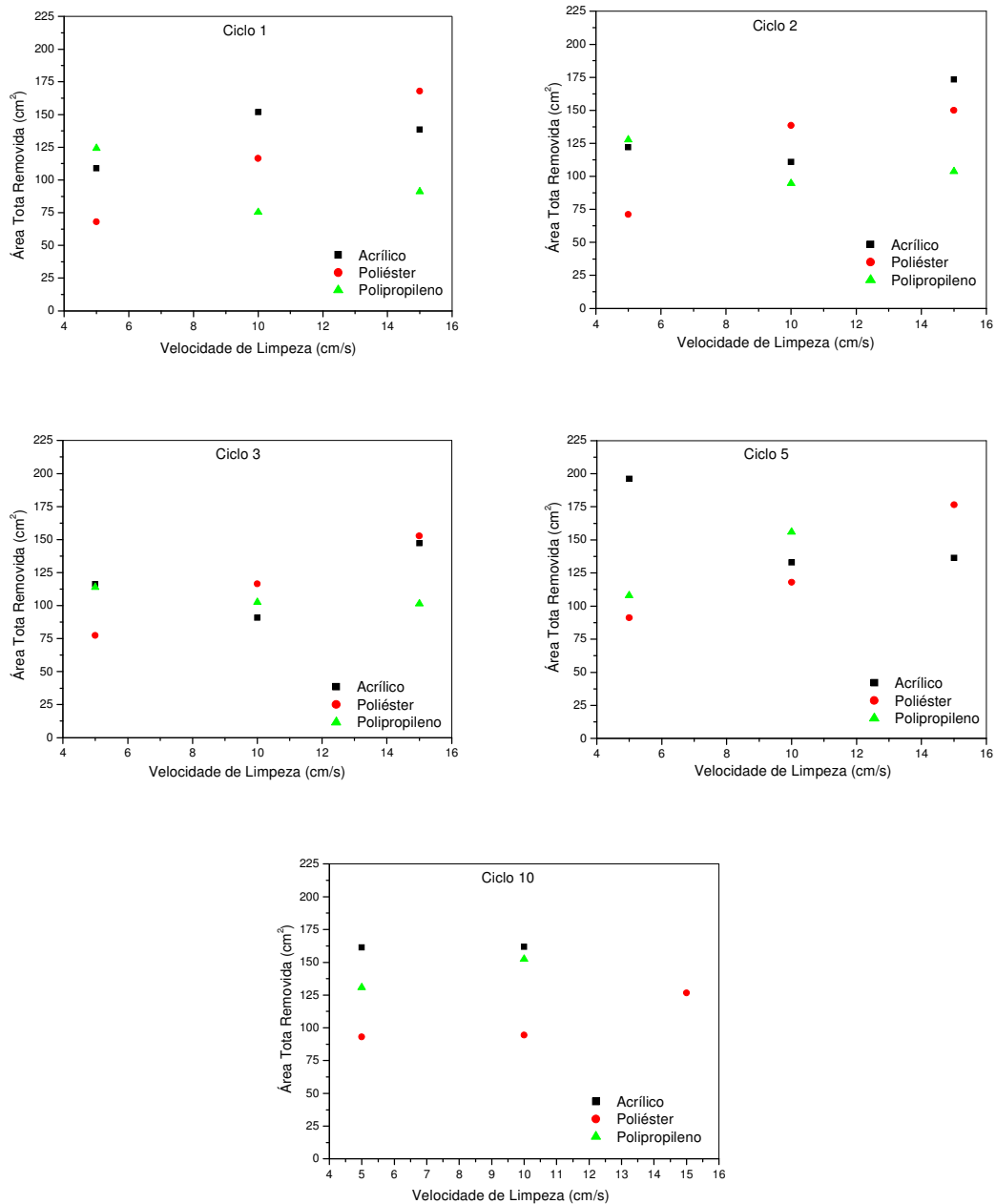


Figura 4.5.2. Área total removida pela velocidade de limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa

Através da análise da Figura 4.5.2 percebe-se que, para o poliéster, houve uma tendência, observadas em todos os ciclos, de aumento da área superficial removida com o aumento da velocidade de limpeza.

Para o acrílico e para o polipropileno não se pode observar uma tendência clara da influência da velocidade de limpeza na área total removida.

A influência da velocidade de limpeza na área total removida pode ser melhor analisada na Figura 4.5.3 que ilustra a área removida em função do número de ciclos para os três tecidos estudados e diferentes velocidades de limpeza.

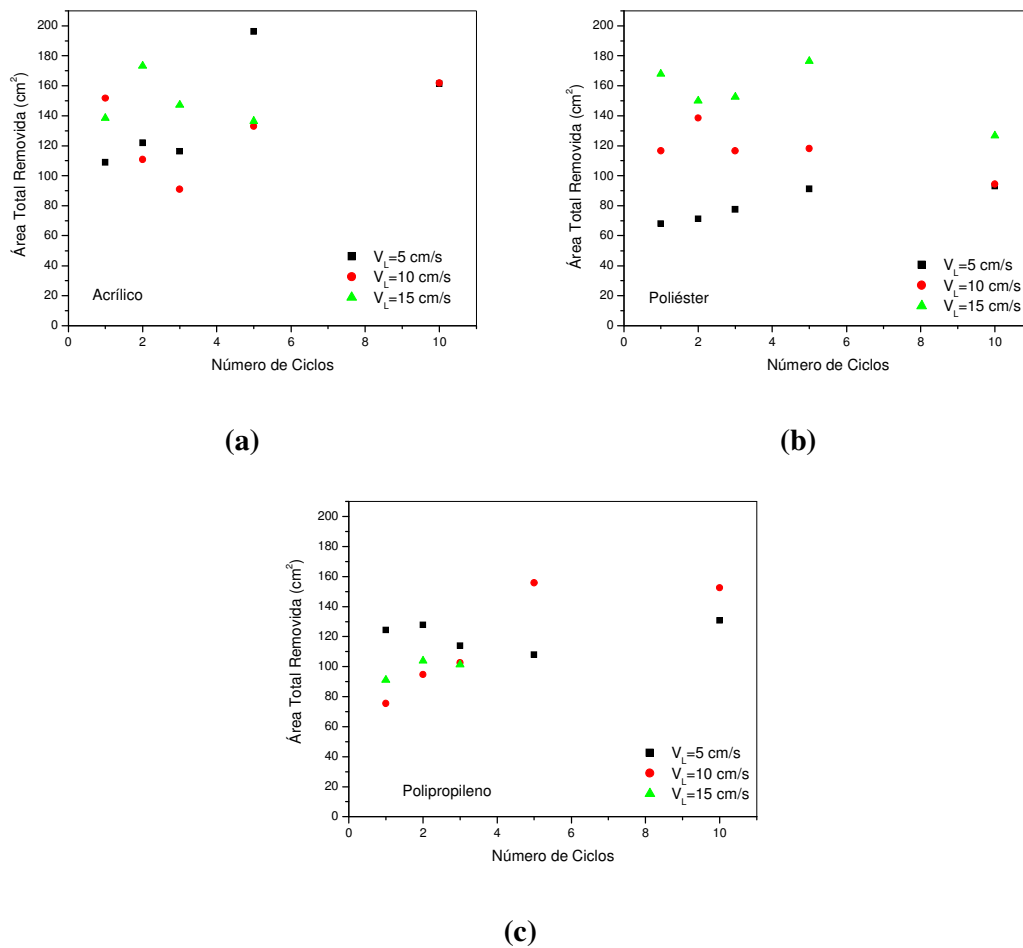


Figura 4.5.3. Área total removida em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa: (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

Através da Figura 4.5.3 não se pode observar uma tendência clara, um comportamento definido da área total removida ao longo dos ciclos de filtração para nenhum dos tecidos estudados.

A influência do número de ciclos na área total removida, para diferentes tecidos, também foi analisada através da Figura 4.5.4. Essa figura apresenta a área total removida em função do número de ciclos para o poliéster, acrílico e polipropileno em diferentes velocidades de limpeza.

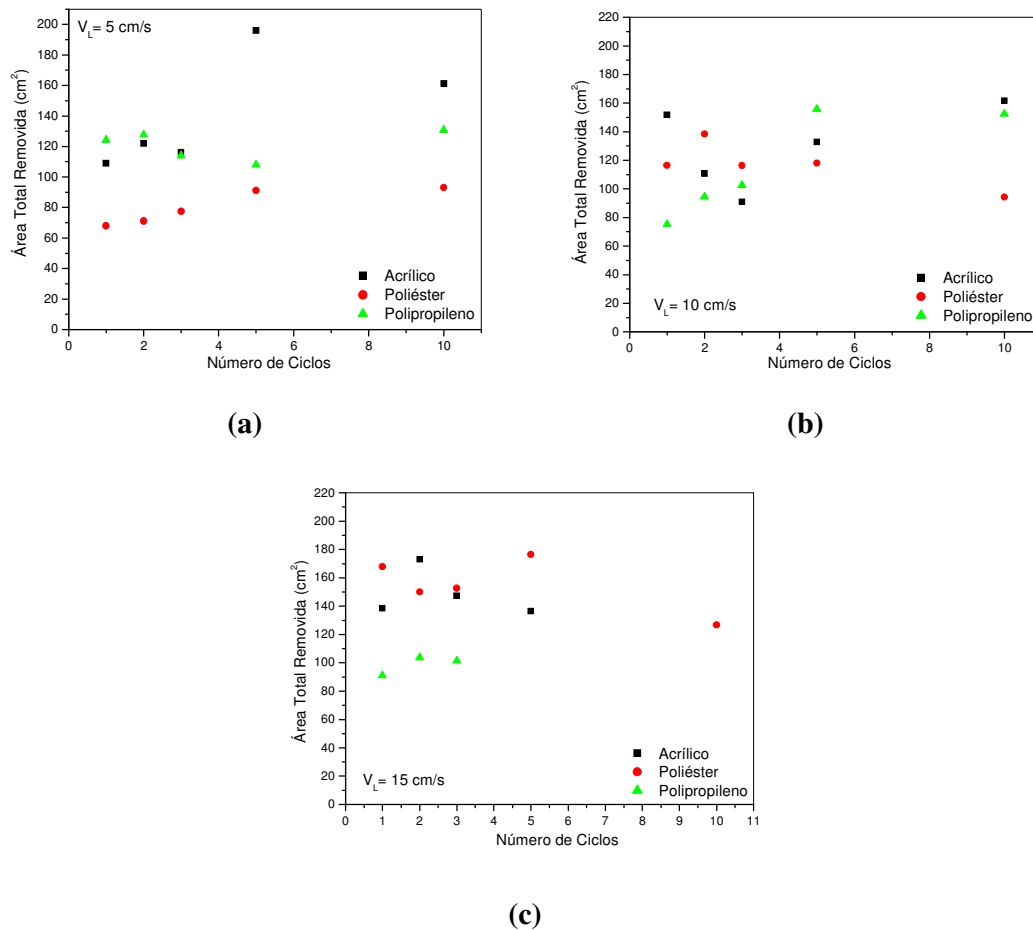


Figura 4.5.4. Área total removida em função do número de ciclos para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa: (a) V_L = 5 cm/s, (b) V_L = 10 cm/s e (c) V_L = 15 cm/s

Através da Figura 4.5.4 verifica-se que para a velocidade de limpeza de 5 cm/s o acrílico apresentou maior área removida que o poliéster e que o polipropileno apresentou um comportamento intermediário. Para a velocidade de limpeza de 10 cm/s essa diferença é menos acentuada, sendo que não foi possível observar um comportamento definido. Já para a velocidade de limpeza de 15 cm/s nota-se que na maioria dos ciclos o poliéster apresenta maiores áreas removidas que o acrílico, e nota-se também que o polipropileno apresenta valores de área total removida significativamente menores que os demais tecidos estudados. Indicando mais uma vez que a velocidade de limpeza age de diferentes formas, dependendo da estrutura do tecido e da torta formada.

Como o acrílico é o tecido mais permeável, mais poroso e com maior abertura superficial, uma menor velocidade de limpeza foi suficiente para uma boa remoção da torta, já o poliéster que formou tortas mais resistentes, necessitou de maiores velocidades de limpeza para melhorar a remoção da torta.

Também foi analisada a influência da velocidade de limpeza no número dos pedaços removidos, como mostra a Figura 4.5.5, e o número de pedaços removidos ciclo a ciclo, apresentado na Figura 4.5.6.

Para o acrílico nota-se que um aumento na velocidade de limpeza representa um aumento no número de pedaços removidos. Já para o poliéster nota-se que a velocidade de limpeza intermediária foi a que removeu a maior quantidade de pedaços.

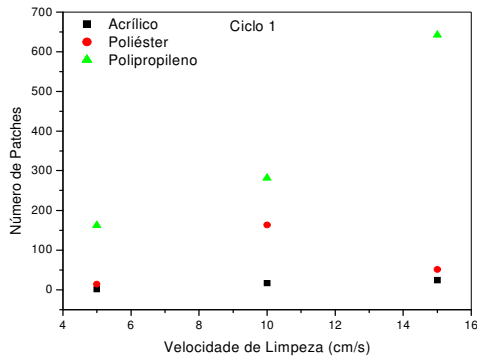
Percebe-se através da Figura 4.5.6 que, para o poliéster, houve uma tendência de aumento do número de pedaços removidos com o aumento do número de ciclos. Como visto anteriormente, a eficiência de limpeza nessas condições operacionais foi praticamente constante, sendo assim, era de se esperar que houvesse uma diminuição

nos pedaços removidos. Para investigar esse fato foram feitas análises da influência da velocidade de filtração no tamanho dos pedaços removidos.

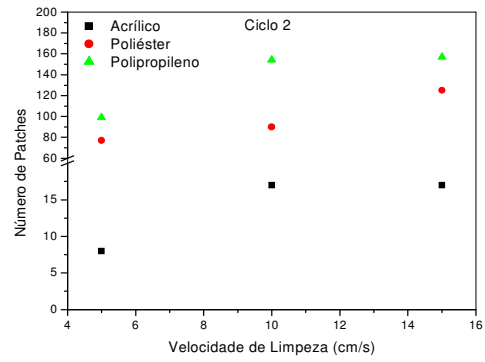
Ainda analisando a Figura 4.5.6 percebe-se que houve uma grande diferença no comportamento da remoção de tortas utilizando o acrílico como meio filtrante. Para esse tecido nota-se que o número de pedaços removidos foi praticamente constante ao longo dos ciclos e bem menor ao comparar-se com o poliéster e com o polipropileno. Esse fato deve estar relacionado a características estruturais desses tecidos. A alta permeabilidade, porosidade e maior abertura superficial do acrílico favoreceram a remoção de maiores pedaços de torta ao utilizar-se esse tecido como meio filtrante.

Com o objetivo de analisar o efeito da velocidade de limpeza no tamanho dos *patches* removidos utilizou-se a metodologia desenvolvida por Tieni; Rodrigues e Aguiar (2004). Essa metodologia consiste em dividir os pedaços removidos por classe de acordo com seu tamanho.

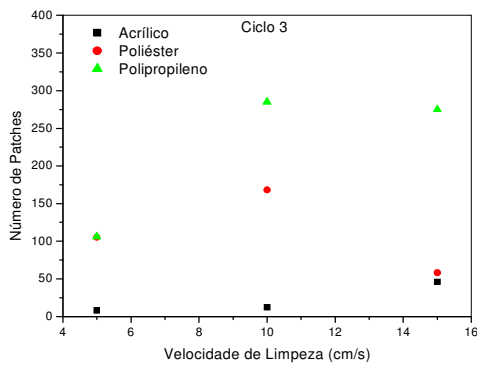
Os pedaços removidos com área entre 0,01 e 0,1 cm² foram considerados muito pequenos e classificados como classe 1. Os pedaços da classe 2 foram considerados pequenos e tinham áreas entre 0,1 e 1,0 cm². A classe 3 era formada por pedaços médios, de área entre 1,0 e 5,0 cm². E, finalmente, os pedaços grandes, com áreas maiores que 5,0 cm², formavam a classe 5. Essa metodologia está apresentada na Tabela 4.5.1.



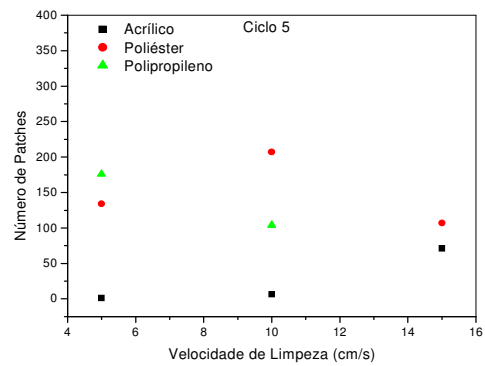
(a)



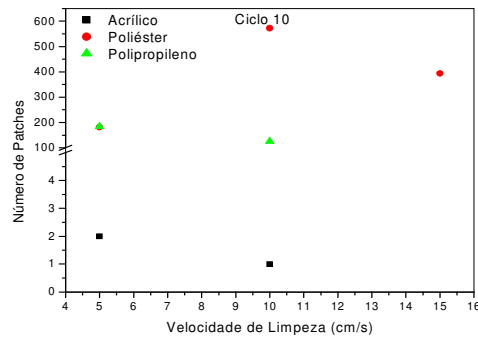
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.5.5. Número de *patches* removidos em função da velocidade de limpeza para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa: (a) ciclo 1, (b) ciclo 2, (c) ciclo 3, (d) ciclo 5 e (e) ciclo 10

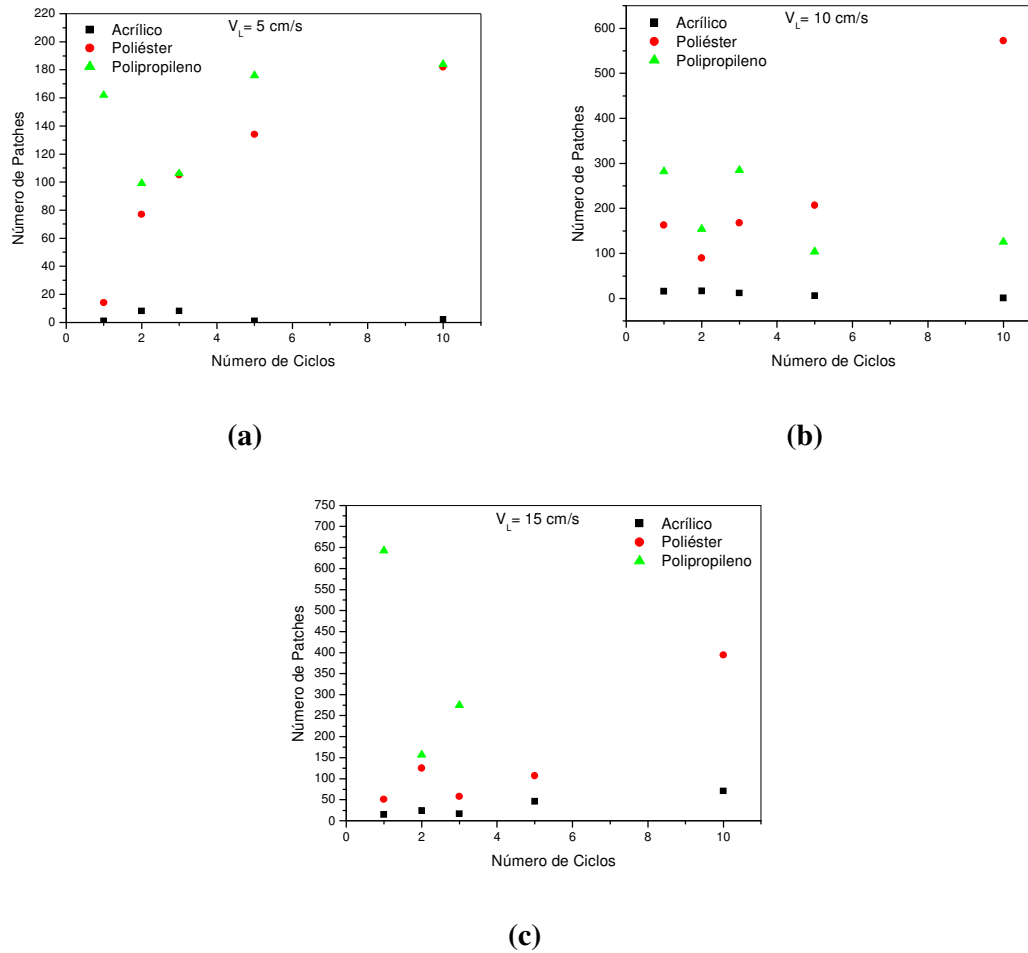


Figura 4.5.6. Número de *patches* removidos em função do número de ciclos para os diferentes tecidos estudados, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa (a) $V_L = 5$ cm/s, (b) $V_L = 10$ cm/s e (c) $V_L = 15$ cm/s

Tabela 4.5.1 - Metodologia utilizada na classificação do tamanho dos *patches* removidos

Classe	Tamanho (cm ²)	Classificação
1	0,01 – 0,1	Muito pequenos
2	0,1 – 1,0	Pequenos
3	1,0 – 5,0	Médios
4	> 5,0	Grandes

Utilizando esta metodologia, foram construídas curvas da variação da quantidade de pedaços removidos, segundo sua classe, para as diferentes velocidades de limpeza utilizadas, ilustrada pela Figura 4.5.7.

Analisando a Figura 4.5.7 verifica-se que, para o acrílico, os pedaços removidos muito pequenos, classe 1, representam uma porcentagem insignificante do total. Para menor velocidade de limpeza, de 5 cm/s ocorreu principalmente a remoção de pedaços grandes, classe 3 e 4. Ao aumentar-se a velocidade de limpeza verificou-se um aumento dos pedaços pequenos removidos, classe 2.

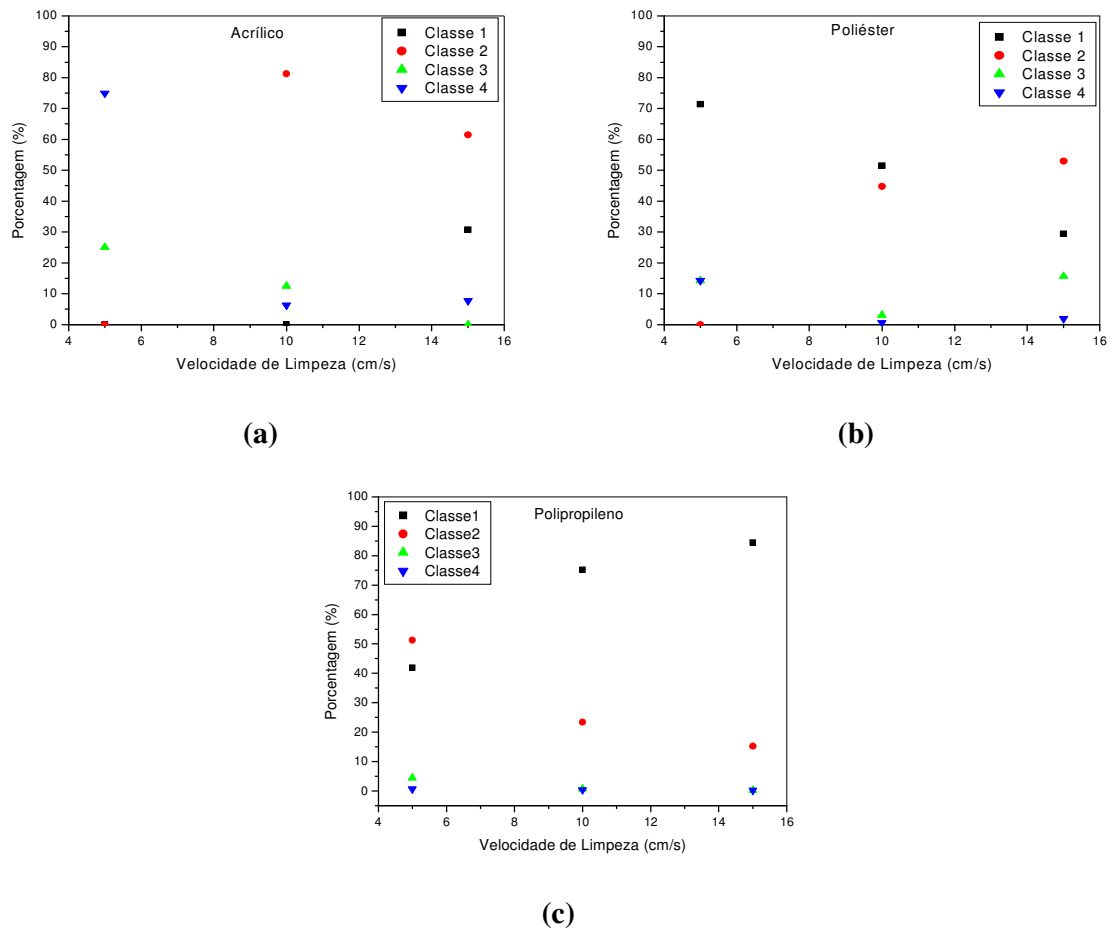


Figura 4.5.7. Influência da velocidade de limpeza na variação da porcentagem dos pedaços removidos, de diferentes classes de tamanho para o primeiro ciclo de filtração, com perda de carga máxima de 3920 Pa (a) acrílico, (b) poliéster e (c) polipropileno

Para o poliéster verifica-se que a porcentagem de pedaços muito pequenos removidos diminui com o aumento da velocidade de limpeza. Os pedaços pequenos e médios apresentaram um aumento na porcentagem com o aumento da velocidade de limpeza.

As observações acima confirmam discussões anteriores, que os dois tecidos apresentaram praticamente a mesma área total removida, no entanto o número de pedaços removidos com o acrílico como meio filtrante foram muito inferiores ao número de pedaços removidos para o poliéster, indicando que os pedaços removidos para o poliéster seriam menores que os pedaços removidos para o acrílico.

Para possibilitar melhor discussão sobre o tamanho dos pedaços removidos foram construídas curvas das distribuições dos tamanhos dos pedaços removidos e também das distribuições do número de pedaços removidos para o acrílico e para o poliéster com a finalidade de identificar a contribuição de cada classe de tamanho de patchy removido no total de área removida.

A Figura 4.5.8 (a) ilustra o comportamento da distribuição dos tamanhos dos pedaços removidos e a Figura 4.5.8 (b) da distribuição do número de pedaços removidos com o tamanho dos pedaços removidos para o acrílico, para velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e diferentes velocidades de limpeza.

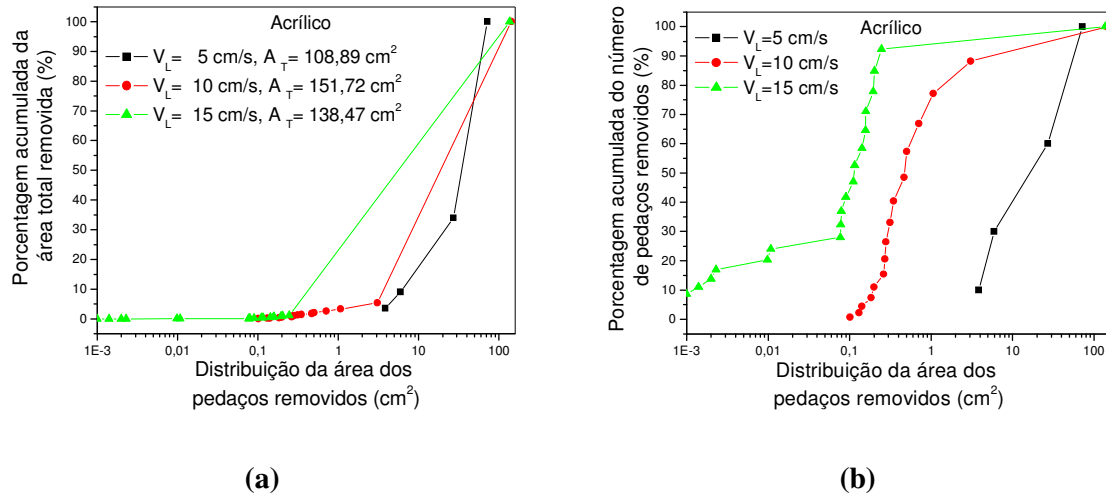


Figura 4.5.8. Acrílico (a) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos na área total removida e (b) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3920 Pa

Através da Figura 4.5.8 nota-se que os pedaços de torta removidos de tamanho menores do que $0,1 \text{ cm}^2$ representaram 0,0, 0,3 e 0,3% da área total removida do filtro para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente. Indicando que o aumento da velocidade de limpeza, de 5 para 10 cm/s, proporcionou um aumento na porcentagem da área total removida com tamanho dos pedaços removidos menores do que $0,1 \text{ cm}^2$. Para os pedaços removidos menores do que 1 cm^2 , a porcentagem da área total ainda foi nula para a velocidade de limpeza de 5,0 cm/s e subiu para 3,5% para a velocidade de limpeza de 10 cm/s, respectivamente, no entanto esses pedaços representaram 79 e 94% dos pedaços removidos para as velocidades de limpeza de 10 e 15 cm/s, respectivamente. Os tamanhos máximos das áreas removidas foram de 72, 144 e 137 cm^2 , para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente.

A Figura 4.5.9 (a) ilustra o comportamento da distribuição dos tamanhos dos pedaços removidos e a Figura 4.5.9 (b) da distribuição do número de pedaços removidos com o tamanho dos pedaços removidos utilizando o poliéster como meio

filtrante, para velocidade de filtração de 5 cm/s, perda de carga máxima de 3920 Pa e diferentes velocidades de limpeza.

Verifica-se através da Figura 4.5.9 que os pedaços de torta removidos de tamanho menores do que $0,1 \text{ cm}^2$ representaram 4, 7 e 2% da área total removida do filtro para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente. Sendo assim, o aumento da velocidade de limpeza de 5 para 10 cm/s proporcionou um aumento na porcentagem da área total removida com tamanho dos pedaços removidos menores do que $0,1 \text{ cm}^2$. Já para os pedaços removidos menores do que 1 cm^2 , a porcentagem da área total removida com tamanho dos pedaços removidos menores do que 1 cm^2 é de 12, 25 e 10% para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente, representando 84, 97 e 88% dos pedaços removidos. Os tamanhos máximos das áreas removidas foram de 38, 85 e 144 cm^2 , para as velocidades de limpeza de 5, 10 e 15 cm/s, respectivamente.

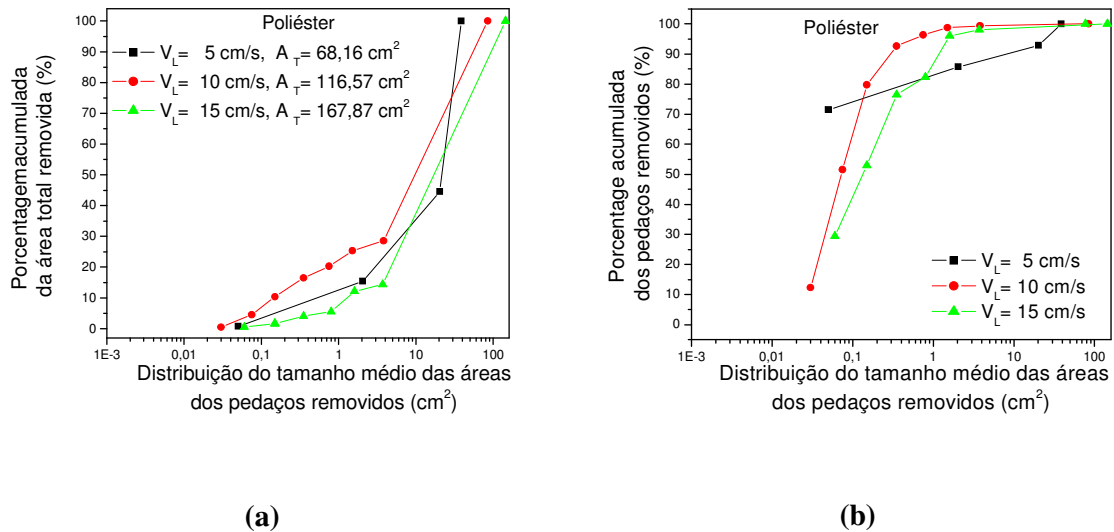


Figura 4.5.9. Poliéster (a) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos na área total removida e (b) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3920 Pa

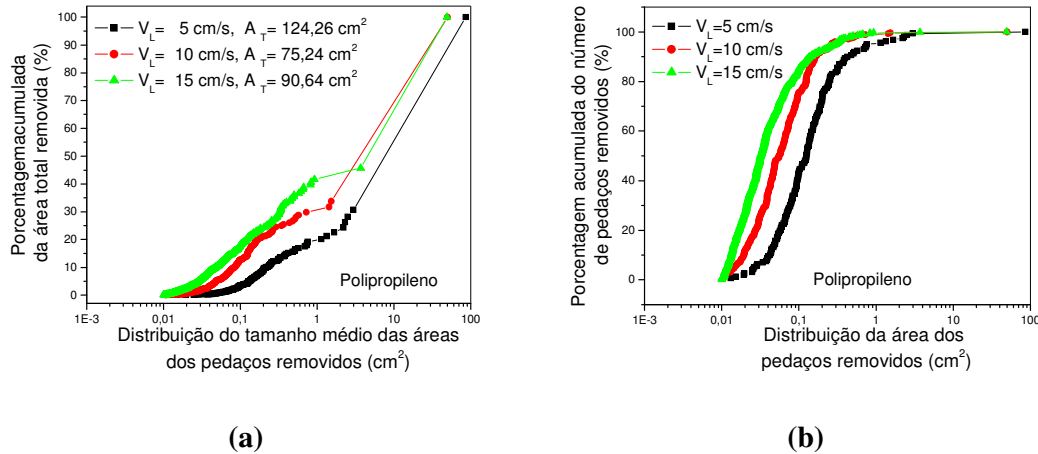


Figura 4.5.10. Polipropileno (a) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos na área total removida e (b) Distribuição do tamanho médio das áreas dos pedaços removidos no número total dos pedaços removidos, para o primeiro ciclo de filtração e perda de carga máxima de 3920 Pa

Comparando as distribuições para o acrílico e poliéster como meio filtrante nota-se que em todas as velocidades de limpeza a remoção de pedaços pequenos e médios para o poliéster teve uma representatividade muito maior que para o acrílico. Indicando que características estruturais do acrílico, como maior abertura superficial e maior permeabilidade favorecem a remoção de maiores pedaços de torta.

Foram feitas também análises dos *patches* removidos para diferentes velocidades de filtração, 5 e 10 cm/s, utilizando o acrílico e o poliéster como meio filtrante.

Para essas condições experimentais as áreas foram marcadas somente para os ciclos 1, 2 e 3. Esta escolha foi devido à grande dificuldade para marcar as áreas removidas. Porque, como não houve um contraste adequado na imagem entre a parte destacada e a parte que permaneceu retida, a marcação das áreas removidas era feita manualmente, já que o programa não conseguia fazer o reconhecimento.

A Figura 4.5.11 ilustra a comparação entre as frações de remoção de área e de massa para o acrílico e o polipropileno utilizando a velocidade de filtração de 5 e 10 cm/s, com o objetivo de verificar a influência da velocidade de filtração e estrutura do tecido na área total removida.

A fração de limpeza, neste caso, não foi um bom parâmetro para se analisar a influência da velocidade de filtração na eficiência de limpeza, que pode ser melhor analisada com a massa retida no filtro após a limpeza, já que a massa coletada para diferentes velocidades de filtração não foi a mesma.

Analisando a Figura 4.5.11 (a) e 4.5.11 (b), nota-se que, novamente, a fração de limpeza em termos mássicos (símbolos cheios) teve valores bem aproximados da eficiência em termos de área (símbolos vazios), comprovando a eficiência do método utilizado por Tieni (2005).

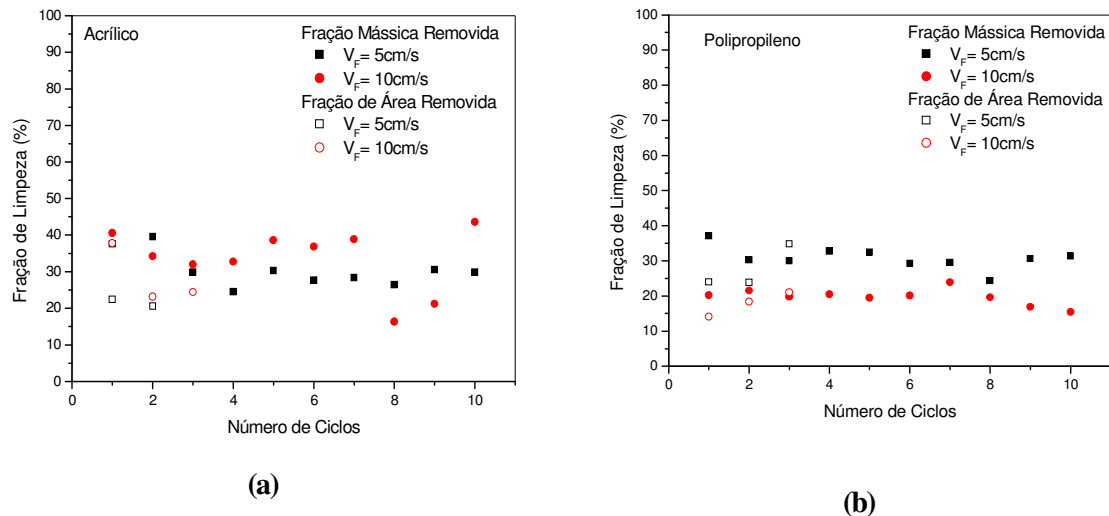


Figura 4.5.11. Frações de limpeza em função do número de ciclos para diferentes velocidades de filtração (a) acrílico e (b) polipropileno

A Figura 4.5.12 ilustra a área total removida e o número de pedaços.

Como pode ser visto através da Figura 4.5.12, a área total removida apresentou um comportamento definido e diferente para os meios filtrantes estudados com o decorrer dos ciclos de filtração. O polipropileno, como o poliéster nas condições anteriormente estudadas, apresentou tendência de aumento de área total removida ao longo dos ciclos de filtração, enquanto o acrílico novamente apresentou uma diminuição da área removida do primeiro para o segundo ciclo, com tendência a se estabilizar nos ciclos posteriores.

Nota-se ainda que, para o acrílico, a maior velocidade de filtração foi a que proporcionou maiores valores de área total removida, enquanto que para o polipropileno os maiores valores de área total removida foram obtidos para velocidade de filtração menor. Esse fato pode ser justificado pela diferenças nas massas coletadas no ciclo de filtração, sendo que quanto maior a massa coletada, mais fácil é a remoção da torta, gerando maiores valores de área total removida.

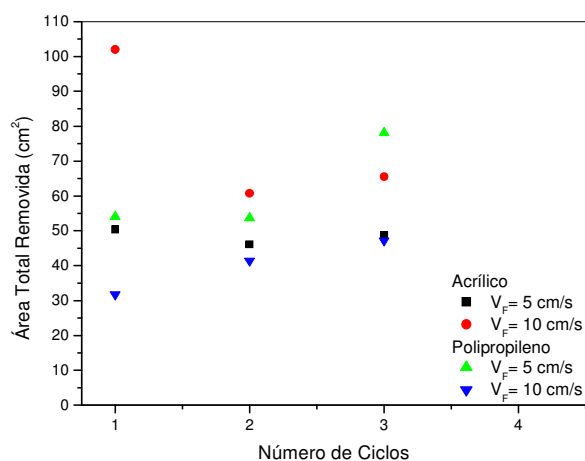


Figura 4.5.12. Área total removida em função do número de ciclos para diferentes velocidades de filtração

Para melhor análise da regeneração dos tecidos foram construídas curvas de número de pedaços removidos para diferentes velocidades de filtração para os dois meios filtrantes estudados, conforme ilustrado pela Figura 4.5.13

Observou-se novamente um comportamento bem definido e diferente para os dois tecidos estudados. Para o acrílico nota-se que o número de pedaços removidos decai ao longo dos ciclos de filtração. Para o polipropileno observa-se que há um aumento de pedaços removidos do primeiro para o segundo ciclo, que diminui novamente no terceiro ciclo.

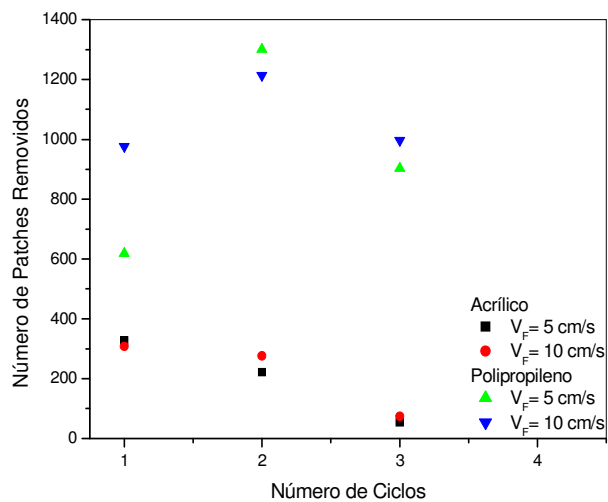


Figura 4.5.13. Número de patches removidos em função do número de ciclos para diferentes VF

Os resultados obtidos discordaram com os resultados obtidos por Dittler et al. (2002), em que o autor, utilizando como técnica de limpeza o pulso de ar comprimido, observou um aumento do número de pedaços removidos com o decorrer dos ciclos de filtração, indicando que existem vários fatores que devem ser levados em consideração para concluir-se sobre a evolução do número de pedaços removidos ao longo dos ciclos de filtração.

Ainda observando a Figura 4.5.13 pode-se verificar que o número de blocos removidos para o acrílico é significativamente menor que o número de pedaços removidos para o polipropileno, apesar da pequena diferença entre a área total removida, o que implica em maiores pedaços removidos para o acrílico.

Análises feitas anteriormente comprovaram a suspeita de que o acrílico teve maiores pedaços removidos em relação ao polipropileno. Esse fato pode ser justificado pela estrutura desse tecido, que possui maior abertura superficial e maiores valores de permeabilidade e porosidade, características que facilitaram a remoção da torta de filtração, gerando o destacamento de pedaços maiores de tortas.

Até o presente momento não foi possível verificar nenhuma relação entre os resultados aqui apresentados e a perda de carga residual, já que a massa retida e a área total removida não justificaram seu comportamento.

Deste modo, procurou-se investigar a distribuição de tamanho dos *patches* removidos ao longo dos ciclos de filtração para verificar uma possível relação do tamanho dos *patches* com a perda de carga residual.

Observando a Figura 4.5.6 percebe-se que, para o acrílico, há um aumento do número de pedaços removidos com o aumento da velocidade de limpeza. Notou-se então uma relação do número de *patches* removidos com a perda de carga residual. Através da Figura 4.3.5 (a) verificou-se que, para a velocidade de limpeza maior (15 cm/s), a curva de perda de carga residual foi maior, apesar de ser a velocidade de limpeza que proporcionou a menor retenção de partículas. Este fato indica que a massa retida no tecido após a limpeza é a única responsável pela perda de carga residual, sendo que pode haver diferença na configuração das partículas retidas que podem influenciar na resistência ao fluxo. Ao analisar a Figura 4.5.6 percebe-se que essa velocidade de

limpeza foi a que removeu maior quantidade de patches. Essa distribuição dos patches removidos pode ter influenciado no aumento da perda de carga residual. A Figura 4.5.14 ilustra o número de patches removidos para diferentes velocidades de limpeza e para os três tecidos estudados.

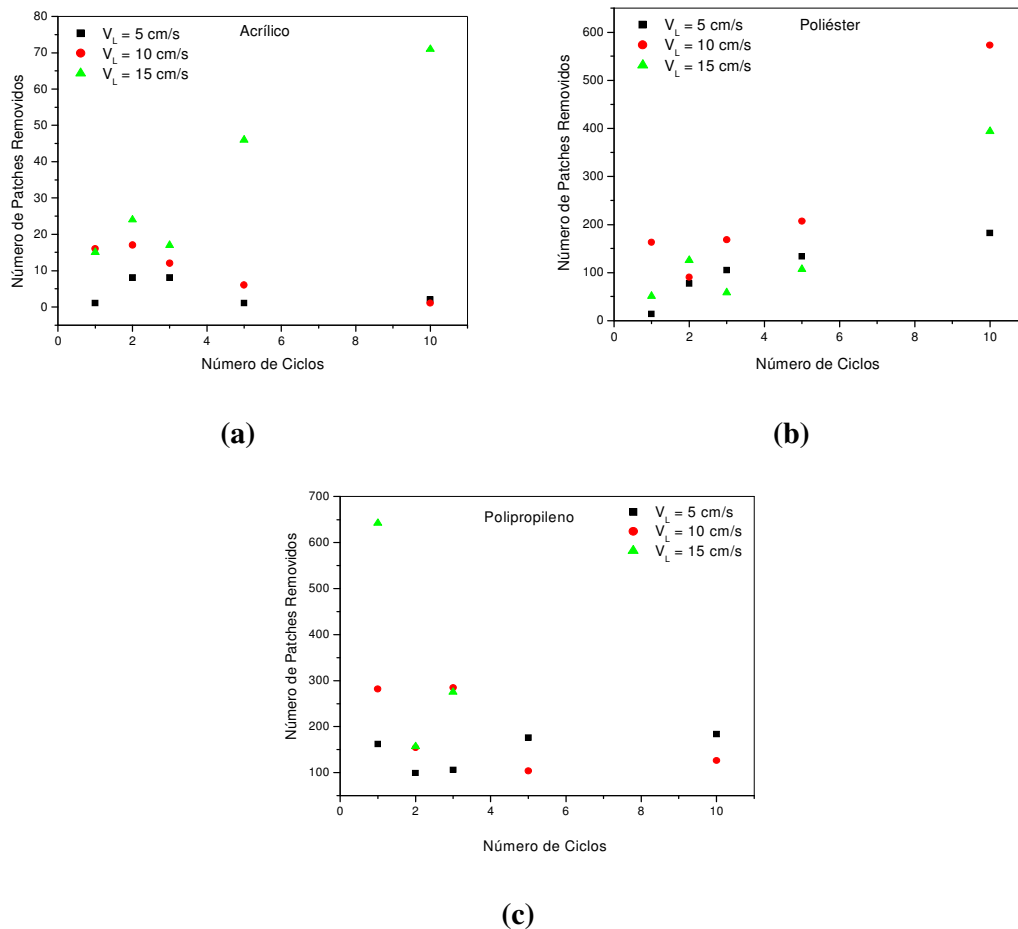


Figura 4.5.14. Número de *patches* removidos em função do número de ciclos para diferentes velocidades de limpeza, velocidade de filtração de 5 cm/s e perda de carga máxima de 3920 Pa (a)acrílico, (b)poliéster e (c)polipropileno

Observando a Figura 4.5.14 fica claro o aumento do número de pedaços removidos com o aumento da velocidade de limpeza. Para o poliéster o comportamento não foi definido. Para o polipropileno não foi possível demarcar os patches removidos a partir do terceiro ciclo, devido a dificuldades na marcação das áreas, no entanto, notou-

se um grande número de patches removidos. Porém seria prematuro concluir algo sobre a relação do número de pedaços removidos e a perda de carga residual para o polipropileno.

Diante dos resultados obtidos conclui-se que o acrílico é o tecido mais indicado para a filtração da rocha fosfática, com uma perda de carga máxima admitida de 3920 Pa e velocidade de limpeza de 5 cm/s. Porque essa foi a condições que possibilitou a maior coleta de partículas, sendo necessárias menos interrupções no processo e foi a velocidade de limpeza que gerou uma boa regeneração do tecido e causa um menor desgaste, contribuindo para a sua maior vida útil.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos na realização deste trabalho é possível apresentar as seguintes conclusões:

- O polipropileno apresentou menor período de filtração interna, devido à rápida obstrução de seus poros, já que possuía menores valores de porosidade e permeabilidade;
- O tempo de filtração é maior para filtros de maior permeabilidade, tornando-os economicamente mais vantajosos, pois possibilita maior coleta de partícula para atingir uma determinada perda de carga
- O primeiro ciclo é o que apresenta a maior massa coletada, já que o filtro ainda se encontra limpo e novo, nos demais ciclos de filtração, a massa coletada é cada vez menor e tende a se tornar constante. O tecido que proporcionou a maior massa coletada foi o acrílico seguido pelo poliéster e menor para o polipropileno;
- A massa removida apresentou tendência de permanecer constante durante os ciclos de filtração.
- Em alguns casos, a menor massa retida não significou menor perda de carga residual, indicando que há outros fatores que influenciam na perda de carga residual.
- A permeabilidade e a porosidade do meio filtrante interferiram nos valores de massa retida acumulada após a limpeza e de perda de carga residual, sendo que os tecidos que possuíam menores valores de permeabilidade e porosidade tiveram maiores valores de perda de carga residual;

- A permeabilidade e a porosidade do meio filtrante interferiram nos valores de porosidade e resistência específica da torta de filtração, sendo que meios filtrantes mais porosos, mais permeáveis e com maior abertura superficial geraram tortas de filtração com maior permeabilidade e menor resistência específica, possibilitando a maior coleta de partículas;
- A perda de carga residual não pode ser considerada um parâmetro adequado para avaliar a eficiência de remoção, uma vez que o polipropileno, apesar de apresentar maior perda de carga residual, apresentou maior fração removida;
- A área total removida não apresentou um comportamento definido com o decorrer do número de ciclos.
- Observou-se um aumento do tamanho dos pedaços removidos com o aumento da massa coletada, comprovando que tortas mais espessas são mais facilmente removidas;
- A maior porcentagem dos pedaços removidos foi de áreas entre 0,01 e 0,1 cm².
- Houve um aumento do número de pedaços removidos com o número de ciclos, para o poliéster e polipropileno em todas as condições operacionais, já para o acrílico houve uma diminuição do número de pedaços removidos.
- A fração de massa removida apresentou maiores valores compatíveis com a fração de área removida
- Com o aumento da perda de carga máxima, as frações de massa e de área removida tenderam a apresentar valores próximos entre si.
- O tecido recomendado para a filtração do concentrado fosfático, nessas condições experimentais, é o acrílico, pois possibilitou maior coleta de

partículas e regenerações menos frequentes, conseqüentemente, possui maior vida útil;

- Para todos os tecidos é recomendado o uso de perda de carga máxima de 3920 Pa.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como prosseguimento dos estudos realizados neste trabalho ainda há muitos aspectos importantes no processo de filtração e no fenômeno de remoção por blocos a serem investigados, tais como:

- O estudo da filtração e da remoção por blocos utilizando diferentes materiais particulados, provenientes de processos industriais
- Estudar o fenômeno de remoção por blocos em escala microscópica, visualizando a diferença da estrutura da torta onde há a remoção e onde permanece intacta
- Estimativa de parâmetros, como a porosidade da torta remanescente no tecido, através de microfotografias do tecido
- Estudar a influência do formato e da granulometria das partículas nos *patches* removidos
- Estudar a relação das forças de adesão com a remoção dos *patches*

REFERÊNCIAS*

- ACGIH – American Conference of Governmental Industrial Hygienists. **Threshold limit values for chemical substances and physical agents in the work-room environment with intended changes for 1990-1991**. Cincinnati-Ohio: ACGIH, 1991.
- AGUIAR, Monica Lopes. **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, 1991.
- AGUIAR, M. L. ; COURY, José Renato ; COSTA, L. F. . Verificação da compressão de tortas de filtração de gases, por meio de medidas diretas e indiretas da porosidade. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS - ENEMP, 23., Maringá, 1996. **Anais ...** Maringá : UEPA, 1995. v. 2. p. 797-809.
- ASSOCIAÇÃO DE ENGENHEIROS ALEMÃES. **VDI 3926**: verificação de meios de filtros para filtros purificáveis: verificação padrão para avaliação comparativa de filtros purificáveis. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure - VDI, 2003. (Instruções VDI). [Título original: VDI 3926. Part 1: testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media].
- CALLÉ, S.; BÉMER, D.; THOMAS, D.; CONTAL, P.; LECLERC, D. Changes in the performances of filter media during clogging and cleaning cycles. **Ann. Occup. Hyg.**, v. 45, n. 2, p. 115-121, 2001.
- CALLÉ, S.; CONTAL, P.; THOMAS, D.; BÉMER, D.; LECLERC, D. Description of the clogging and cleaning cycles of filter media. **Powder Technology**, v. 123, n. 1, p.40-52, 2002a.
- 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, n. 2/3, p. 213-217, 2002b.
- CAVASSENO, V. **Industrial air pollution engineering**. McGraw-Hill, 1980.
- CHENG, Y.-H; TSAI, C. **Journal of Aerosol Science and Technology**, v. 29, n. 4, p.315-328, 1998.
- DAVIS, W. T.; BUONICORE, A. J. **Air pollution engineering manual**. p. 118- 131. New York: Air and Waste Management Association Van Nostrand Reinhold, 1992.
- DERÍSIO, J. C. **Introdução ao controle da poluição ambiental**. São Paulo: CETESB, 1992.
- DITTLER, A.; KASPER, G. **Patchy cleanig of rigid filter media**: experimental determination of transient regeneration phenomena. 1999.

* De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

- DITTLER, A.; KASPER, G. Simulation of operational behaviour of patchily regenerated, rigid gas cleaning filter media. **Chemical Engineering Processing**, v.38, p.321-327, 1999.
- DITTLER, A.; FERRER, M. V. MATHUR, P. DJURANOVIC, G. K.; SMITH, D. H. Patchy cleaning of rigid gas filters: transient regeneration phenomena comparison of modelling to experiment. **Powder Technology**, v.124, p. 55- 66, 2002.
- DONOVAN, R. P. **Fabric filtration for combustion sources**. New York: Marcel Dekker, 1985
- DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gás cleaning**. Academic Press, 1989.
- DUO, W.; KIRKBY, N. F.; SEVILLE, J. P. K.; CLIFT, R.; Patchy cleaning of rigid gás filters: I. A probabilistic model. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 1, p. 141 – 151, 1997a.
- DUO, W.; SEVILLE, J. P. K., KIRKBY, N. F.;; BUCHELE, H., CHEUNG, C. K.;; Patchy cleaning of rigid gas filters: II. Experiments and model validation. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 1, p. 153 – 164, 1997b.
- ELLENBECKER, M.J.; LEITH, D. Dust removal from non-woven fabrics-cleaning methods need to be improved. **Filtration and Separation**, p.316-320, Jul/Aug. 1981.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48, n. 2, p. 89-94, 1952.
- GRAEF, A., STENHOUSE, J.T.I., WALSH D.C. The effect of solid aerosol on prefilter material performance. **Journal of Aerosol Science**, v. 26, suppl 1, p.S741-S742, 1995.
- HINDS, W. C. **Aerosol technology**. Boston: John Wiley and Sons, 1982.
- INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A. R. F.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V. C. How accurate is Darcy's law. **American Ceramic Society Bulletin**, p.64-68, Nov, 1999.
- ITO, L. X. **Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases**. 2002. 107 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
- JAPUNTICH, D.A.; STENHOUSE, J.I.T., LIU, B.Y.H. Experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters. **Journal of Aerosol Science**, v. 25, n. 2, p. 385-393, 1994.
- KANAOKA, C.; AMORNKITBSMRUNG, M. Effect of permeability on release of captured dust from a rigid ceramic filters. **Powder Technology**, v.118, p.113-120, 2001.
- KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. **Powder Technology**, v. 86, p. 22, 1996.

- LEITH, D.; ALLEN, R. W. K. Dust filtration by fabric filters. In: WAKMAN, R. J. **Progress in Filtration.** 9. ed. Elsevier, 1986. v.4, p.1-57.
- LIU, B.Y.H.; K.L. RUBOW. **Air filtration by fibrous media. Fluid filtration: gas.** Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1986.
- LORA, Electo Eduardo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte.** 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.
- LUCAS, Renato Dantas de. **Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos.** 2000. 137 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.
- MARTINS, Jaqueline Costa. **Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido.** 2001. 164 f. Dissertação (Mestrado em Controle Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2001.
- MAUSCHITZ G.; KOSCHUTNIG, W.; HOFLINGER, W. The influence of filter regeneration on the internal particle rearrangement of nonwovens for cleanable dust filters. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING, 16., 2004. **Proceedings ...**
- MCKENNA, J. .D.; FURLONG, D. A. Fabric filters. In: **Air pollution engineering manual.** / Air & Waste Management Association Editado por Anthony, Buonicore, Wayne Davies, New York, 1992. p. 114-132
- MCKENNA, J. D.; FURLONG, D. A. Fabric filters. In: AIR AND WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION (Ed.); BUONICORE, Anthony J. (Ed.); DAVIES, Wayne T. (Ed.). **Air pollution engineering manual.** New York: AIR AND WASTE MANAGEMENT ASSOCIATION, 1992. cap. 3, p. 114-132
- MOREIRA, Fabio Luis. **Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros manga.** 1998. 94 f. Dissertação (Mestrado em Controle Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1998.
- MYCOCK, J. C.; MCKENNA, J. D.; THEODORE, L. **Handbook of air pollution control engineering and technology.** 1995.
- 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS - ENEMP, 28., Teresópolis, 2000. **Anais ...** Rio de Janeiro: Programa de Engenharia Química COPPE/UFRJ, 2001. v.1, p. 191-197.
- OSÓRIO, V. M. **Comportamento da filtração de gases em meios filtrantes de celulose.** 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

- REMBOR, H. J.; KASPER, G. Fibrous Filters: measurements of spacial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency. In: WORLD CONGRESS ON PARTICLE TECHNOLOGY, 3., 1998, Brighton. **Proceedings...**
- RODRIGUES, Antonio Carlos Marques. **Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecido de polipropileno e de algodão.** 2004. 123 f. Dissertação (Mestrado em Controle Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004a.
- RODRIGUES, K. B. **Estudo da deposição de material particulado em diferentes meios filtrantes, na filtração gás-sólido.** 2006. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- RODRIGUES, K. B. Filtração gás-sólido em diferentes meios filtrantes: influência do tratamento do filtro no ciclo de filtração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS - ENEMP, 31., Urberlândia, 2004. **Anais ...** 2004b. CD-ROM
- RUBOW, K. L.; LIU, B. Y. H.. Characteristics of membrane filters for particle collection. In: **Fluid filtration:** gas. 1986. v. 1, p. 74-94 (ASTM Tech. Publ., 975).
- SEVILLE, J. P. K.(Ed.). **Gas cleaning in demanding applications.** Blackie Academia and Professional. School of Chemical Engineering; The University of Birmingham, 1997.
- SILVA, C. R. N.; NEGRINI, V. S.; AGUIAR, M. L.; COURY, J. R. Influence of gás velocity on cake formation and detachment. **Powder Technology**, v. 101, n. 2, p. 165-172, Feb. 1999.
- SILVA NETO, Olimpio Gomes de. **Estudo da porosidade de tortas em filtros de manga operando na filtração de gases.** 2002. 180 f. Tese (Doutorado em Controle Ambiental) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.
- SONG, C. B, PARK, H. S.; LEE, K. W. Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles. **Powder Technology**, v. 163, n. 3, p. 152-159, Apr. 2006.
- STOCKLMAYER, Ch.; HOLLINGER, W. Simulation of the long term Behavior of Regenerateable Dust Filters. **Filtration & Separation.** p. 373-377, May 1998.
- STRAUSS, W. **Industrial gás cleaning.** 2. ed. Oxford: Pergamon Press, 1975.
- THOMAS, D., PENICOT, P., CONTAL, P., LECLERC, D., VENDEL, J. Clogging of fibrous filter by solid aerosol particles. Experimental and modeling study. **Chemical Engineering Science**, v. 56, p. 3549-3561, 2001.
- TIENI, E.F. RODRIGUES, K. B. AGUIAR, M.L. Estudo do comportamento de limpeza de filtros manga para os tecidos de poliéster e de acrílico durante a operação de filtração de gases. In: ENCONTRO NACIONAL DOS ESTUDANTES DE MATERIAIS PARTICULADOS - XXXI ENEMP, 2004. **Anais ...**

- TIENI, E. F. **Filtração de gases: estudo do fenômeno da limpeza por blocos**. 2005. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.
- WALSH, D. C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. **Filtration and Separation**, v. 33, n. 06, 1996
- WALSH, D.C., STENHOUSE, J.I.T. The effect of particle charge and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material. **Journal of Aerosol Science**, v.28, n. 2, p.783-799, 1997.
- WALSH, D. C., STENHOUSE, J. I. T, SCURRAH, K. L., GRAEF, A. The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance. **Journal of Aerosol Science**, v. 27, Suppl.1, p. S617-S618, 1996.

APÊNDICE A

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

1410	3628,4									
1440	3638,2									
1470	3657,9									
1500	3706,9									
1530										
1560	3765,7									
1590	3814,8									
1620	3844,2									
1650	3873,6									
1680	3903,0									
1710	3922,6									
Peso do filtro inicial (g)	422	431,74	431,39	429,31	427,01	426,77	427,69	427,24	427,2	
Peso filtro + torta (g)	442,66	443,96	446,09	446,83	447,42	446,6	445,42	444,3	441,12	
Peso filtro após limpeza (g)	431,74	431,39	429,31	427,01	426,77	427,69	427,24	427,2	427,89	
Sulfite (g)	4,858	4,8858	4,824	4,901	4,87	4,87	4,877	4,877	4,884	
Sulfite + torta (g)	15,641	15,641	21,656	24,707	25,581	23,656	22,901	22,313	18,802	

1380	3510,8									
1410	3569,6									
1440	3628,4									
1470	3628,4									
1500	3755,9									
1530	3834,4									
1560	3834,4									
1590	3834,4									
1620	3873,6									
1650	3903,0									
1680	3932,4									
Peso do filtro inicial (g)	420,71	426,24	427,42	428,81	428,14	427,44	427,08	428,84	426,41	431,05
Peso filtro + torta (g)	439,48	439,55	439,04	441,06	440,66	440,63	440,57	443,49	439,6	442,76
Peso filtro após limpeza (g)	426,26	427,42	428,81	428,14	427,44	427,08	428,84	426,41	431,05	426,44
Sulfite (g)	4,815	4,863	4,848	4,871	4,845	4,836	4,834	4,827	4,832	4,852
Sulfite + torta (g)	18,038	17,027	15,046	17,806	17,807	18,133	16,588	21,866	13,707	20,95

1380	3501,0									
1410	3530,4									
1440	3550,0									
1470	3559,8									
1500	3589,2									
1530	3618,6									
1560	3648,1									
1590	3667,7									
1620	3687,3									
1650	3765,7									
1680	3922,6									
Peso do filtro inicial (g)	420,87	420,71	425,13	425,92	425,36	425,56	425,62	426,14	425,93	425,93
Peso filtro + torta (g)	438,64	437,36	436	441,74	437,41	438,98	434,19	435	435,5	436,94
Peso filtro após limpeza (g)	424,71	425,13	425,92	425,36	425,56	425,62	426,14	425,93	425,81	425,72
Sulfite (g)	4,762	3,098	3,071	3,094	3,078	3,081	3,068	3,085	3,078	3,075
Sulfite + torta (g)	17,98	15,33	13,31	19,454	15,485	16,397	11,193	12,147	13,708	14,361

Ensaio 4

Tabela A4: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	117,7	294,2	294,2	313,8	333,4	343,2	392,3	372,7	470,7	441,3
30	196,1	882,6	882,6	961,0	1049,3	1078,7	1167,0	1127,8	1147,4	1186,6
60	343,2	1225,8	1265,1	1323,9	1480,8	1412,2	1480,8	1382,7	1510,2	1490,6
90	559,0	1529,8	1490,6	1618,1	1686,7	1647,5	1706,3	1676,9	1667,1	1667,1
120	696,3	1706,3	1726,0	1824,0	1853,4	1814,2	1892,7	1784,8	1873,1	1814,2
150	774,7	1892,7	1882,9	1980,9	2000,5	1971,1	1980,9	1912,3	1961,3	1902,5
180	980,7	1980,9	1990,7					2000,5	0,0	1980,9
210	1196,4									
240	1333,7									
270	1461,2									
300	1549,4									
330	1696,5									
360	1784,8									
390	1873,1									
420	1961,3									
Peso do filtro inicial(g)	420,6	423,94	425,08	425,23	425,53	425,58	425,57	425,48	425,43	425,22
Peso filtro + torta (g)	425,77	427,87	427,21	427,18	427,46	427,51	427,37	427,21	427,21	427,49
Peso filtro após limpeza (g)	423,94	425,08	425,23	425,53	425,58	425,57	425,48	425,43	425,22	425,75
Sulfite (g)	4,8	4,792	4,83	4,866	4,8	4,83	4,846	4,835	4,773	4,792
Sulfite + torta (g)	6,7445	7,666	6,805	6,475	6,879	6,742	6,766	6,584	6,79	6,847

Ensaio 5

Tabela A5: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

	Perda de carga (Pa)									
Tempo (s)	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	137,3	245,2	294,2	333,4	294,2	343,2	362,8	421,7	402,1	568,8
30	196,1	823,8	931,6	1029,7	833,6	1157,2	1029,7	1186,6	1098,3	1176,8
60	235,4	1186,6	1314,1	1353,3	1235,6	1372,9	1333,7	1422,0	1323,9	1382,7
90	0,0	1461,2	1588,7	1569,1	1549,4	1510,2	1529,8	1657,3	1559,2	1578,9
120	353,0	1647,5	1716,2	1706,3	1706,3	1686,7	1755,4	1784,8	1706,3	1765,2
150	529,6	1814,2	1853,4	1892,7	1873,1	1843,6	1863,3	1912,3	1882,9	1892,7
180	657,0	1902,5	1961,3	1971,1	1980,9	1971,1	1961,3	2000,5	1971,1	1961,3
210	902,2	1961,3								
240	990,5									
270	1098,3									
300	1216,0									
330	1304,3									
360	1461,2									
390	1510,2									
420	1627,9									
450	1745,6									
480	1853,4									
510	1931,9									
540	1990,7									
Peso do filtro inicial(g)	421,45	425,06	425,44	425,81	425,85	425,69	425,72	425,98	426,079	426,49
Peso filtro + torta (g)	426,79	427,79	427,31	428,37	427,31	427,49	427,79	427,92	428,57	428,22
Peso filtro após limpeza (g)	425,06	425,44	425,81	425,85	425,69	425,72	425,98	426,079	426,49	427,54
Sulfite (g)	4,846	4,825	4,811	4,803	4,76	4,855	4,822	4,82	4,821	4,82
Sulfite + torta (g)	6,645	7,154	6,449	7,295	6,538	6,537	6,677	6,661	6,834	5,415

Ensaio 6

Tabela A6: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 10 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	176,5	470,7	568,8	568,8	568,8	608,0	892,4	804,1	1157,2	804,1
30	186,3	1167,0	1323,9	1951,5	1618,1	2079,0	1912,3	2186,9	2383,0	2304,6
60	215,7	1971,1	2451,7	2647,8	2373,2	2892,9	2736,0	2883,1	3177,3	3000,8
90	402,1	2736,0	3059,7	3451,9	2853,7	3628,4	3344,1	3559,8	3628,4	3657,9
120	627,6	3216,6	3706,9	3952,1	3451,9	4050,1	3863,8	3873,6	4167,8	3961,9
150	961,0	3687,3	4109,0		3922,6		4187,4	4226,6		
180	1314,1	3961,9								
210	1637,7									
240	1971,1									
270	2284,9									
300	2588,9									
330	2961,6									
360	3246,0									
390	3559,8									
420	3844,2									
450	4059,9									
Peso do filtro inicial(g)	420,26	423,91	424,87	425,29	425,03	425,32	425,36	425,22	425,28	425,68
Peso filtro + torta (g)	425,66	427,77	426,77	426,99	427,29	427,31	427,37	427,34	427,49	427,29
Peso filtro após limpeza (g)	423,91	424,87	425,29	425,03	425,32	425,36	425,22	425,28	425,68	425,59
Sulfite (g)	4,403	4,837	4,797	4,775	4,784	4,726	4,848	4,801	4,78	4,827
Sulfite + torta (g)	6,566	6,44	6,291	6,778	6,759	6,758	6,978	6,828	6,599	6,417

Ensaio 7

Tabela A7: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 10 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	176,5	382,5	490,3	588,4	617,8	666,8	794,3	666,8	784,5	872,8
30	333,4	1363,1	1775,0	1980,9	2000,5	1667,1	2657,6	2206,5	2353,6	2196,7
60	539,4	2265,3	2991,0	2883,1	2559,5	2461,5	3471,5	2638,0	3128,3	2765,5
90	823,8	3275,4	3824,6	3775,5	3412,7	3187,1	4069,7	3353,9	3677,5	3412,7
120	1323,9	4128,6	4511,0	4363,9	3736,3	3873,6		3805,0	4089,4	3677,5
150	2049,6				4010,9	4118,8		4059,9		4099,2
180	2510,5									
210	3020,4									
240	3550,0									
270	4030,5									
Peso do filtro inicial(g)	420,51	424,03	424,77	425,04	424,98	425,03	425,47	425,36	425,28	425,42
Peso filtro + torta (g)	425,67	427,23	427,43	427,47	426,78	426,79	427,22	426,98	426,92	427,32
Peso filtro após limpeza (g)	424,03	424,77	425,04	424,98	425,03	425,47	425,36	425,28	425,42	425,33
Sulfite (g)	4,916	4,626	4,893	4,866	4,904	4,924	4,904	4,952	4,916	4,847
Sulfite + torta (g)	6,629	7,317	7,324	7,36	6,643	6,218	6,78	6,16	6,516	6,972

Ensaio 8

Tabela A8: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 10 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=5880\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (cmH ₂ O)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	166,7	568,8	598,2	764,9	882,6	872,8	941,4	1108,1	2334,0	2167,3
30		1941,7	2186,9	2598,7	2785,1	2863,5	2647,8	2892,9	4265,9	3971,7
60	274,6	2951,8	2902,8	3628,4	3628,4	3687,3	3138,1	3628,4	5158,3	5197,5
90	480,5	3883,4	3981,5	4658,1	4413,0	4452,2	3824,6	4295,3	5687,8	5678,0
120	902,2	4707,2	4658,1	5079,8	5040,6	4854,3	4363,9	4717,0	5933,0	6099,7
150	1255,2	5236,7	5187,7	5580,0	5589,8	5177,9	4893,5	5217,1		
180	1588,7	5746,7	5629,0	5893,8	5903,6	5678,0	5001,4	5638,8		
210	2039,8	5982,0	5923,2			5884,0	5511,3	5913,4		
240	2539,9						5884,0			
270	2912,6									
300	3255,8									
330	3638,2									
360	3775,5									
390	4275,7									
420	4511,0									
450	4687,6									
	5030,8									
510	5109,2									
540	5325,0									
570	5540,7									
600	5805,5									
630	5933,0									
Peso do filtro inicial(g)	422,95	428,87	428,43	428,48	428,37	428,31	428,18	428,11	429,62	430,24
Peso filtro + torta (g)	433,76	431,43	431,06	430,83	430,77	431,01	431,35	430,84	432,13	432,4
Peso filtro após limpeza (g)	428,87	428,43	428,48	428,37	428,31	428,18	428,11	429,62	430,24	428,43
Sulfite (g)	4,823	4,823	4,787	4,82	4,748	4,795	4,822	4,814	4,795	4,755
Sulfite + torta (g)	9,208	7,727	7,38	7,396	7,766	7,766	8,086	6,102	6,737	8,871

Ensaio 9

Tabela A9: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 10 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=5880\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	117,7	441,3	411,9	441,3	784,5	774,7	735,5	725,7	784,5	774,7
	294,2	1176,8	1382,7	2275,1	1569,1	2304,6	1863,3	1814,2	1569,1	2304,6
60	735,5	2383,0	2343,8	3559,8	3147,9	2892,9	2863,5	2755,7	3147,9	2892,9
90	1157,2	3177,3	3128,3	4207,0	3903,0	3550,0	3510,8	3530,4	3903,0	3550,0
120	1461,2	3873,6	3805,0	4707,2	4314,9	3922,6	4001,1	3903,0	4314,9	3922,6
150	1882,9	4520,8	4314,9	5011,2	4707,2	4481,6	4314,9	4314,9	4707,2	4481,6
180	2304,6	4942,5	4805,2	5344,6	4952,3	4707,2	4628,7	4550,3	4952,3	4707,2
210	2745,8	5217,1	5383,8			5099,4	5001,4	4824,8		5099,4
240	3049,9						5295,6			
270	3373,5									
300	3755,9									
330	4050,1									
360	4314,9									
390	4687,6									
420	4932,7									
450	5187,7									
	5315,2									
510	5472,1									
540	5795,7									
570	6080,1									
Peso do filtro inicial(g)	421,92	425,48	426	426,79	426,33	426,42	426,44	426,3	426,33	426,42
Peso filtro + torta (g)	429,19	429,7	429,81	429,97	430,09	430,23	429,91	430,03	430,09	430,23
Peso filtro após limpeza (g)	425,48	426	426,79	426,33	426,42	426,44	426,3	426,5	426,42	426,44
Sulfite (g)	4,788	4,816	4,789	4,81	4,791	4,812	4,786	4,816	4,791	4,812
Sulfite + torta (g)	8,33	8,388	7,796	8,292	8,525	8,664	8,379	8,252	8,525	8,664

Ensaio 10

Tabela A10: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 5 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	58,8	196,1	235,4	294,2	274,6	313,8	333,4	333,4	333,4	568,8
30	78,5	1078,7	1274,9	1490,6	1922,1	2000,5	1569,1	1765,2	1765,2	1824,0
60	255,0	2098,6	2216,3	2373,2	2530,1	2608,6	2314,4	2177,1	2294,7	2294,7
90	568,8	2549,7	882,6	2843,9	2981,2	3000,8	2726,2	2588,9	2726,2	2608,6
120	784,5	2922,4	3098,9	3079,3	3177,3	3059,7	2942,0	2942,0	2843,9	2942,0
150	1098,3	3138,1	3334,2	3432,3	3451,9	3373,5	3157,7	3138,1	3255,8	3314,6
180	1451,4	3432,3	3648,1	3589,2	3648,1	3530,4	3353,9	3334,2	3471,5	3510,8
210	1588,7	3569,6	3746,1	3765,7	3805,0	3726,5	3569,6	3550,0	3726,5	3648,1
240	2079,0	3765,7	3883,4	3981,5	4001,1	3922,6	3765,7	3687,3	3805,0	3883,4
270	2353,6	3883,4	4138,4				3805,0	3863,8	4020,7	4197,2
300	2785,1	4118,8					4059,9			
330	2961,6									
360	3059,7									
390	3216,6									
420	3491,1									
450	3530,4									
480	3726,5									
510	3746,1									
540	3981,5									
Peso do filtro inicial (g)	415	420,84	421,42	421,32	421,23	421,06	421	421,2	421,12	421,56
Peso filtro + torta (g)	424,32	424,43	424,48	424,6	424,53	423,89	424,83	424,62	424,38	425,02
Peso filtro após limpeza (g)	420,84	421,42	421,32	421,23	421,06	421	421,2	421,12	421,56	420,94
Sulfite (g)	5,06	5,1	5,1	5,11	5,1	5,06	5,1	5,1	5,09	5,08
Sulfite + torta (g)	8,7	8,08	8,25	8,46	8,61	7,99	8,75	8,62	8,89	9,16

Ensaio 11

Tabela A11: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	39,2	137,3	137,3	196,1	294,2	294,2	255,0	353,0	294,2	353,0
30	78,5	1039,5	1078,7	1372,9	1235,6	1372,9	1176,8	1510,2	1294,5	0,0
60	274,6	1471,0	1627,9	1922,1	1804,4	1961,3	1726,0	1863,3	1745,6	1804,4
90	588,4	1843,6	2137,8	2392,8	2294,7	2569,3	2196,7	2196,7	2118,2	2177,1
120	863,0	2255,5	2392,8	2647,8	2687,0	2902,8	2490,9	2628,2	2490,9	2451,7
150	1137,6	2804,7	2745,8	3020,4	2981,2	3197,0	2785,1	3020,4	2863,5	2843,9
180	1471,0	3040,0	3236,2	3393,1	3255,8	3412,7	3020,4	3216,6	3059,7	3040,0
210	1804,4	3295,0	3432,3	3550,0	3628,4	3628,4	3255,8	3471,5	3295,0	3197,0
240	1961,3	3530,4	3687,3	3726,5	4040,3	3922,6	3530,4	3785,3	3608,8	3432,3
270	2216,3	3608,8	3961,9	3883,4			3726,5	4118,8	3903,0	3687,3
300	2490,9	3883,4		4275,7			3922,6		4079,5	3883,4
330	2804,7	4059,9								4099,2
360	2942,0									
390	3138,1									
420	3334,2									
450	3667,7									
480	3883,4									
510	3922,6									
Peso do filtro inicial (g)	414,82	418,85	418,59	418,29	418,2	418,46	418,27	418,31	418,09	418,31
Peso filtro + torta (g)	424,07	424,59	423,96	424,23	423,41	423,3	423,4	423,26	423,26	423,07
Peso filtro após limpeza (g)	418,85	418,59	418,28	418,2	418,46	418,27	418,31	418,09	418,31	417,93
Sulfite (g)	5,06	5,04	5,05	5,06	5,06	5,05	5,04	5,02	5,06	5,04
Sulfite + torta (g)	10,31	10,08	10,73	11,06	9,92	10,07	10,09	10,21	9,95	10,14

Ensaio 12

Tabela A12: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	78,5	137,3	176,5	215,7	196,1	215,7	215,7	215,7	255,0	274,6
30	98,1	0,0	784,5	882,6	843,4	921,8	902,2	863,0	882,6	980,7
60	196,1	902,2	1235,6	1294,5	1137,6	1196,4	1235,6	1137,6	1176,8	1274,9
90	392,3	1235,6	1529,8	1569,1	1372,9	1372,9	1353,3	1412,2	1471,0	1510,2
120	568,8	1569,1	1726,0	1902,5	1627,9	1627,9	1569,1	1627,9	1686,7	1667,1
150	764,9	1843,6	1961,3	2098,6	1824,0	1863,3	1784,8	1843,6	1863,3	1863,3
180	980,7	2059,4	2235,9	2314,4	2059,4	2020,2	1980,9	2059,4	2137,8	2098,6
210	1235,6	2314,4	2392,8	2588,9	2314,4	2275,1	2235,9	2255,5	2314,4	2294,7
240	1392,5	2549,7	2647,8	2824,3	2490,9	2549,7	2412,4	2510,5	2471,3	2451,7
270	1627,9	2745,8	2765,5	3040,0	2667,4	2745,8	2549,7	2687,0	2608,6	2608,6
300	1843,6	2922,4	3000,8	3236,2	2863,5	2902,8	2745,8	2843,9	2843,9	2843,9
330	2000,5	3177,3	3118,5	3353,9	3040,0	3157,7	2902,8	3040,0	2961,6	2981,2
360	2196,7	3334,2	3275,4	3530,4	3197,0	3275,4	3157,7	3236,2	3138,1	3177,3
390	2549,7	3491,1	3471,5	3726,5	3373,5	3471,5	3275,4	3412,7	3295,0	3314,6
420	2726,2	3706,9	3608,8	3922,6	3530,4	3608,8	3432,3	3530,4	3451,9	3432,3
450	2843,9	3824,6	3726,5		3706,9	3805,0	3530,4	3667,7	3589,2	3530,4
480	3040,0	3922,6	3844,2		3824,6	3981,5	3667,7	3785,3	3726,5	3667,7
510	3197,0		4020,7		3981,5		3785,3	3942,3	3922,6	3844,2
540	3334,2						3942,3			3961,9
570	3451,9									
600	3628,4									
630	3824,6									
660										
690	4001,1									
Peso do filtro inicial(g)	415,36	417,98	418,06	418,11	417,92	418	417,82	417,93	417,91	417,96
Peso filtro + torta (g)	425,07	424,16	424,66	424,8	424,03	423,7	423,63	423,38	423,05	424,1
Peso filtro após limpeza (g)	417,98	418,06	418,11	417,92	418	417,82	417,93	417,91	417,96	417,79
Sulfite (g)	5,11	5,09	5,09	5,07	5,06	5,06	5,07	5,06	5,05	5,08
Sulfite + torta (g)	12,14	11,22	11,61	11,95	11,14	10,95	10,75	10,49	10,13	11,41

Ensaio 13

Tabela A13: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	19,6	117,7	117,7	137,3	156,9	196,1	235,4	215,7	215,7	196,1
20	19,6	725,7	843,4	549,2	863,0	823,8	1216,0	902,2	1039,5	1098,3
40	39,2	1176,8	1294,5	784,5	1333,7	1235,6	1647,5	1294,5	1412,2	1372,9
60	156,9	1412,2	1510,2	1216,0	1608,3	1451,4	1804,4	1490,6	1608,3	1529,8
80	313,8	1667,1	1627,9	1431,8	1765,2	1627,9	1980,9	1765,2	1804,4	1706,3
100	509,9	1726,0	1745,6	1608,3	1882,9	1765,2		1882,9	1980,9	1882,9
120	725,7	1922,1	1922,1	1765,2	2000,5	1824,0		2039,8		2039,8
140	804,1	2000,5	2059,4	1922,1		1980,9				
160	941,4			2039,8						
180	1137,6									
200	1333,7									
220	1471,0									
240	1667,1									
260	1824,0									
280	1941,7									
300	2059,4									
Peso do filtro inicial(g)	415,48	419,01	419	418,79	418,7	418,7	418,77	418,74	418,93	418,86
Peso filtro + torta (g)	421,16	421,11	421,01	420,83	420,35	420,46	420,34	421,16	420,56	420,4
Peso filtro após limpeza (g)	419,01	419	418,79	418,7	418,7	418,77	418,74	418,93	418,86	418,67
Sulfite (g)	5,08	5,08	5,07	5,14	5,07	5,14	5,07	5,07	5,07	5,05
Sulfite + torta (g)	7,23	7,23	7,33	7,12	6,73	6,7	6,63	7,35	6,75	6,75

Ensaio 14

Tabela A14: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	58,8	117,7	117,7	156,9	137,3	156,9	137,3	235,4	156,9	196,1
20	78,5	745,3	627,6	980,7	529,6	784,5	666,8	980,7	725,7	843,4
40	156,9	1118,0	1000,3	1274,9	902,2	1078,7	980,7	1294,5	1019,9	1137,6
60	255,0	1372,9	1235,6	1471,0	1118,0	1431,8	1314,1	1333,7	1176,8	1294,5
80	411,9	1569,1	1392,5	1726,0	1294,5	1647,5	1529,8	1471,0	1372,9	1490,6
100	568,8	1863,3	1569,1	1922,1	1549,4	1765,2	1784,8	1569,1		1686,7
120	706,1	2039,8	1765,2	2039,8	1765,2	1922,1	1961,3	1706,3	1745,6	1922,1
140	764,9		1961,3		1961,3	2039,8		1843,6	2000,5	2137,8
160	863,0							2020,2		
180	941,4									
200	1176,8									
220	1314,1									
240	1372,9									
260	1549,4									
280	1608,3									
300	1667,1									
320	1843,6									
340	1961,3									
Peso filtro + torta (g)	420,6	420,72	420,51	420,5	420,28	420,55	420,42	420,77	420,47	420,89
Peso filtro após limpeza (g)	417,5	417,44	417,4	417,38	417,48	417,33	417,91	417,37	417,4	417,3
Sulfite (g)	5,08	5,07	5,06	5,05	5,05	5,04	5,05	5,03	5,05	5,06
Sulfite + torta (g)	8,21	8,35	8,15	8,16	7,78	8,25	7,54	8,47	8,11	8,7

Ensaio 15

Tabela A15: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 10 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	745,3	823,8	863,0	941,4	961,0	1059,1	1059,1	1059,1	1157,2
30	333,4	2039,8	2235,9	2177,1	2530,1	1863,3	3040,0	3059,7	3020,4	3098,9
60	509,9	3432,3	3079,3	3569,6	3824,6	3275,4	3922,6	3961,9	3903,0	3844,2
90	863,0	3805,0	3805,0	3883,4		3844,2				
120	1274,9									
150	1784,8									
180	2412,4									
210	2902,8									
240	3275,4									
270	3785,3									
Filtro+torta (g)	422	422,69	422,95	423,46	423,3	423,63	423,7	423,31	423,29	423,1
Filtro após limp. (g)	421,23	421,73	422,07	422,3	422,32	422,43	422,29	422,29	422,37	422,38
Sulfite (g)	4,814	4,815	4,817	4,825	4,81	4,801	4,815	4,82	4,817	4,822
Sulfite + torta (g)	5,584	5,786	5,76	5,906	5,809	5,898	6,134	5,827	5,679	5,582

Ensaio 16

Tabela A16: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 10 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	725,7	813,9	843,4	921,8	941,4	1019,9	980,7	1039,5	1059,1
30	353,0	1873,1	2059,4	2177,1	2490,9	1863,3	2942,0	2961,6	2922,4	3098,9
60	490,3	3255,8	2981,2	3569,6	3736,3	3275,4	4020,7	4001,1	3903,0	3844,2
90	843,4	3530,4	3805,0	3824,6		3844,2				
120	1294,5									
150	1804,4									
180	2451,7									
210	2824,3									
240	3236,2									
270	3726,5									
300	41									
filtro Inicial (g)	418,18	421,23	421,73	422,07	422,3	422,32	422,43	422,29	422,29	422,37
Filtro+torta (g)	422	422,69	422,95	423,46	423,3	423,63	423,7	423,31	423,29	423,1
Filtro após limp. (g)	421,23	421,73	422,07	422,3	422,32	422,43	422,29	422,29	422,37	422,38
Sulfite (g)	4,814	4,815	4,817	4,825	4,81	4,801	4,815	4,82	4,817	4,822
Sulfite + torta (g)	5,584	5,786	5,76	5,906	5,809	5,898	6,134	5,827	5,679	5,582

Ensaio 17

Tabela A17: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 5 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo (s)	Perda de carga (cm H2O)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	666,8	608,0	686,5	706,1	804,1	882,6	764,9	784,5	1019,9
30	372,7	1196,4	1216,0	1196,4	1569,1	1431,8	1353,3	961,0	863,0	1627,9
60	431,5	1529,8	1549,4	1588,7	1784,8	1647,5	1588,7	1392,5	1216,0	1922,1
90	470,7	1804,4	1765,2	1804,4	1941,7	1863,3	1902,5	1686,7	1569,1	2118,2
120	549,2	2039,8	1941,7	2020,2	2098,6	2118,2	2020,2	1843,6	1745,6	2235,9
150	647,2	2157,5	2137,8	2157,5	2196,7	2235,9	2177,1	2020,2	1941,7	2412,4
180	784,5	2334,0	2294,7	2275,1	2334,0	2392,8	2314,4	2196,7	2118,2	2471,3
210	980,7	2451,7	2392,8	2334,0	2471,3	2451,7	2432,0	2412,4	2334,0	2569,3
240	1098,3	2569,3	2510,5	2530,1	2569,3	2608,6	2530,1	2530,1	2510,5	2628,2
270	1196,4	2687,0	2588,9	235,4	2667,4	2706,6	2628,2	2706,6	2608,6	2785,1
300	1314,1	2765,5	2726,2	2628,2	2726,2	2804,7	2785,1	2824,3	2726,2	2863,5
330	1412,2	2824,3	2804,7	2726,2	2765,5	2863,5	2824,3	2902,8	2765,5	2902,8
360	1529,8	2843,9	2922,4		2883,1	2942,0	2961,6	3020,4	2902,8	2981,2
390	1627,9	2942,0	2961,6	2902,8	2922,4	2981,2	3040,0		3020,4	3059,7
420	1765,2	3000,8	3020,4	3000,8	3000,8	3098,9	3138,1	3236,2	3059,7	3138,1
450	1804,4	3079,3	3118,5	3059,7	3020,4	3118,5	3197,0	3295,0	3157,7	3177,3
480	1882,9	3118,5	3157,7	3118,5	3118,5	3236,2	3255,8	3491,1	3275,4	3314,6
510		3197,0	3177,3	3197,0	3157,7	3255,8	3314,6	3530,4	3295,0	3432,3
540	2039,8	3275,4	3275,4	3314,6	3216,6	3295,0	3393,1	3608,8	3393,1	3451,9
570	2098,6	3393,1	3314,6	3353,9	3314,6	3451,9	3412,7	3648,1	3432,3	3510,8
600	2157,5	3451,9	3393,1		3353,9	3491,1		3746,1	3491,1	3628,4
630	2196,7	3491,1	1529,8	3412,7	3393,1	3550,0	3667,7	3805,0		3706,9
660	2255,5	3530,4	1569,1	3471,5	3471,5	3608,8	3687,3	3922,6	3569,6	3765,7
690	2334,0	3608,8		3530,4	3510,8	3687,3	3726,5		3608,8	3805,0
720	2412,4	3648,1	3608,8	3569,6	3628,4	3726,5	3746,1		3687,3	3863,8
750	2510,5	3687,3	3687,3	3608,8	3667,7	3765,7	3805,0		3805,0	3922,6
780	2608,6	3746,1	3765,7	3648,1	3746,1	3805,0	3903,0		3932,4	3981,5
810	2706,6	3785,3		3706,9	3824,6	3883,4				
840		3863,8	3883,4	3805,0	3883,4					
870	2863,5	3942,3		3883,4						
900	2942,0									
930	3020,4									
960	3098,9									
990	3138,1									
1020	3216,6									
1050	3275,4									
1080	3314,6									
1110	3393,1									
1140	3432,3									
1170	3471,5									
1200	3530,4									
1230	3608,8									
1260	3687,3									
1290	3726,5									
1320	3765,7									
1350	3883,4									
1380	3961,9									
Peso do	419,38	425,61	425,25	425,09	424,55	424,5	424,26	424,35	423,98	423,85

filtro inicial (g)										
Peso filtro + torta (g)	433,19	433,33	432,16	432,18	431,86	437,09	432,07	432,46	431,76	433,27
Peso filtro após limpeza (g)	425,61	425,25	425,09	424,55	424,5	424,26	424,35	423,98	423,85	424,14
Sulfite (g)	4,995	4,991	4,985	4,996	4,993	4,946	4,985	4,988	4,996	4,979
Sulfite + torta (g)	12,57	13,032	12,053	12,581	12,366	17,6	12,889	13,346	12,823	13,655

Ensaio 18

Tabela A18: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	353,0	353,0	362,8	362,8	372,7	372,7	392,3	392,3	392,3
30	274,6	804,1	823,8	784,5	804,1	823,8	784,5	764,9	804,1	823,8
60	451,1	1019,9	1078,7	980,7	1000,3	1059,1	980,7	1000,3	1039,5	1000,3
90	529,6	1235,6	1255,2	1196,4	1216,0	1235,6	1216,0	1196,4	1255,2	1176,8
120	627,6	1372,9	1392,5	1353,3	1392,5	1363,1	1372,9	1392,5	1412,2	1372,9
150	706,1	1569,1	1549,4	1549,4	1549,4	1529,8	1569,1	1549,4	1529,8	1588,7
180	784,5	1706,3	1647,5	1657,3	1667,1	1647,5	1686,7	1667,1	1686,7	1706,3
210	882,6	1902,5	1765,2	1863,3	1804,4	1843,6	1863,3	1824,0	1863,3	1902,5
240	1000,3	2039,8	1843,6	1922,1	1863,3	1922,1	1941,7	1882,9	1961,3	2000,5
270	1078,7	2098,6	1902,5	1961,3	1980,9	1980,9	2020,2	1980,9	2000,5	2059,4
300	1274,9	2255,5	2000,5	2000,5	2059,4	2039,8	2098,6	2079,0	2059,4	2186,9
330	1451,4	2334,0	2098,6	2059,4	2177,1	2079,0	2177,1	2157,5	2157,5	2314,4
360	1520,0	2412,4	2196,7	2177,1	2314,4	2196,7	2235,9	2314,4	2235,9	2412,4
390	1618,1	2490,9	2216,3	2245,7	2432,0	2255,5	2334,0	2412,4	2314,4	2490,9
420	1676,9	2588,9	2334,0	2343,8	2490,9	2353,6	2412,4	2490,9	2402,6	2588,9
450	1755,4	2647,8	2392,8	2402,6	2588,9	2412,4	2471,3	2569,3	2471,3	2647,8
480	1843,6	2687,0	2451,7	2471,3	2647,8	2490,9	2569,3	2647,8	2569,3	2706,6
510	1951,5	2745,8	2549,7	2549,7	2687,0	2549,7	2628,2	2706,6	2628,2	2804,7
540	2069,2	2824,3	2628,2	2618,4	2804,7	2628,2	2765,5	2785,1	2687,0	2863,5
570	2128,0	2922,4	2785,1	2696,8	2863,5	2706,6	2843,9	2883,1	2804,7	3000,8
600	2275,1	2981,2	2843,9	2824,3	3000,8	2843,9	2922,4	2942,0	2843,9	3040,0
630	2314,4	3020,4	2902,8	2883,1	3059,7	2902,8	2961,6	2961,6	2922,4	3118,5
660	2353,6	3059,7	2942,0	2961,6	3118,5	2961,6	3020,4	3020,4	2981,2	3197,0
690	2451,7	3118,5	3000,8	3020,4	3197,0	3020,4	3059,7	3079,3	3040,0	3255,8
720	2490,9	3177,3	3040,0	3079,3	3236,2	3098,9	3098,9	3138,1	3098,9	3314,6
750	2569,3	3216,6	3079,3	3118,5	3295,0	3138,1	3138,1	3197,0	3138,1	3334,2
780	2647,8	3236,2	3118,5	3157,7	3334,2	3197,0	3157,7	3226,4	3216,6	3373,5
810	2726,2	3295,0	3138,1	3216,6	3373,5	3226,4	3216,6	3295,0	3275,4	3451,9
840	2785,1	3393,1	3197,0	3295,0	3432,3	3295,0	3295,0	3353,9	3334,2	3491,1
870	2863,5	3432,3	3295,0	3334,2	3491,1	3353,9	3353,9	3412,7	3393,1	3550,0
900	2912,6	3491,1	3353,9	3412,7	3550,0	3412,7	3432,3	3491,1	3471,5	3608,8
930	2961,6	3530,4	3432,3	3471,5	3608,8	3491,1	3491,1	3530,4	3530,4	3667,7
960	3020,4	3608,8	3491,1	3510,8	3687,3	3530,4	3569,6	3608,8	3589,2	3706,9
990	3040,0	3648,1	3550,0	3589,2	3706,9	3589,2	3628,4	3667,7	3667,7	3746,1
1020	3098,9	3706,9	3608,8	3667,7	3765,7	3667,7	3706,9	3746,1	3726,5	3805,0
1050	3275,4	3746,1	3706,9	3726,5	3785,3	3746,1	3765,7	3805,0	3805,0	3844,2
1080	3334,2	3785,3	3765,7	3785,3	3844,2	3805,0	3805,0	3863,8	3863,8	3863,8
1110	3412,7	3844,2	3805,0	3844,2	3883,4	3883,4	3863,8	3903,0	3903,0	3903,0
1140	3471,5	3883,4	3863,8	3903,0	3922,6	3922,6	3903,0	3942,3	0,0	3922,6
1170	3530,4	3922,6	3903,0	3942,3						
1200	3589,2									
1230	3648,1									
1260	3706,9									
1290	3765,7									
1320	3844,2									
1350	3883,4									
1380	3922,6									
filtro Inicial (g)	418,37	422,68	422,32	422,7	422,25	422,06	422,56	422,31	421,98	422,21

Filtro+torta (g)	434,37	436,1	434,65	434,78	435	435,6	436,02	435,08	435,15	434,25
Filtro após limp. (g)	422,68	422,32	422,7	422,25	422,06	422,56	422,31	421,98	422,21	422,65
Sulfite (g)	4,925	4,925	4,911	4,904	4,892	4,904	4,901	4,898	4,977	4,979
Sulfite + torta (g)	16,625	18,7	16,83	17,28	17,95	17,925	18,512	17,879	17,902	16,602

Ensaio 19

Tabela A19: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	215,7	392,3	431,5	509,9	568,8	529,6	627,6	627,6	784,5	745,3
30	392,3	1019,9	1255,2	1333,7	1157,2	1274,9	1255,2	1490,6	1314,1	1255,2
60	666,8	1314,1	1686,7	1569,1	1627,9	1569,1	1529,8	1784,8	1647,5	1608,3
90	823,8	1686,7	2000,5	1941,7	1882,9	1863,3	1941,7	2079,0	1902,5	1863,3
120	1039,5	1922,1	2255,5	2235,9	2098,6	1922,1	2235,9	2334,0	2079,0	2216,3
150	1274,9	2353,6	2569,3	2392,8	2275,1	2137,8	2412,4	2530,1	2314,4	2451,7
180	1490,6	2530,1	2804,7	2549,7	2392,8	2275,1	2667,4	2687,0	2471,3	2765,5
210	1726,0	2745,8	2981,2	2647,8	2569,3	2373,2	2785,1	2981,2	2745,8	2804,7
240	1843,6	2804,7	3157,7	2706,6	2726,2	2549,7	2883,1	3079,3	2804,7	3040,0
270	2235,9	2981,2	3373,5	2961,6	2961,6	2608,6	3177,3	3295,0	2961,6	3197,0
300	2275,1	3157,7	3471,5	3079,3	3098,9	2902,8	3236,2	3393,1	3138,1	3275,4
330	2530,1	3197,0	3510,8	3098,9	3236,2	3020,4	3412,7	3510,8	3177,3	3412,7
360	2687,0	3393,1	3667,7	3275,4	3432,3	3157,7	3569,6	3569,6	3197,0	3628,4
390	2647,8	3550,0	3746,1	3353,9	3451,9	3197,0	3667,7	3628,4	3314,6	3746,1
420	2981,2	3589,2	3863,8	3412,7	3589,2	3451,9	3746,1	3765,7	3353,9	3873,6
450	3020,4	3726,5	3981,5	3628,4	3667,7	3491,1	3844,2	3854,0	3393,1	3981,5
480	3040,0	3854,0		3726,5	3706,9	3491,1	3922,6	3952,1	3412,7	
510	3255,8	3971,7		3912,8	3814,8	3608,8			3608,8	
540	3314,6			3932,4	3922,6	3687,3			3706,9	
570	3451,9					3746,1				
600	3569,6					3824,6				
630	3569,6					3912,8				
660	3648,1									
690	3824,6									
720	3883,4									
750	3932,4									
filtro Inicial (g)	418,63	423,06	422	422,1	421,85	421,92	422	421,77	421,79	421,82
Filtro+torta (g)	433,56	435,1	433,46	433,51	434,98	433,94	437,24	437,61	436,15	434,25
Filtro após limp. (g)	423,06	422	422,1	421,85	421,92	422	421,77	421,79	421,82	421,87
Sulfite (g)	4,835	4,925	4,911	4,904	4,892	4,904	4,901	4,898	4,977	4,979
Sulfite + torta (g)	15,352	18,033	16,359	16,516	18,033	16,863	20,656	20,592	19,17	17,36

Ensaio 20

Tabela A20: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	353,0	372,7	470,7	490,3	509,9	529,6	529,6	529,6	529,6
30	313,8	1098,3	1078,7	1255,2	1372,9	1235,6	1333,7	1196,4	1216,0	1353,3
60	372,7	1490,6	1490,6	1569,1	1686,7	1608,3	1647,5	1451,4	1549,4	1647,5
90	568,8	1804,4	1824,0	1843,6	1902,5	1882,9	1882,9	1765,2	1882,9	1902,5
120	706,1	1922,1	2020,2	2020,2	2059,4	2039,8	2059,4	1980,9	2079,0	2059,4
150	941,4	2039,8								
180	1098,3									
210	1255,2									
240	1431,8									
270	1627,9									
300	1784,8									
330	1902,5									
360	1980,9									
filtro Inicial (g)	418,62	421,9	422,45	422,48	422,62	422,7	422,73	422,86	422,77	422,7
Filtro+torta (g)	423,76	424,2	424,02	424,74	424,57	424,46	424,6	424,06	424,46	424,64
Filtro após limp. (g)	421,9	422,45	422,48	422,62	422,7	422,73	422,86	422,77	422,7	422,8
Sulfite (g)	2,212	3,026	3,03	3,05	3,036	3,04	3,02	3,069	3,04	3,041
Sulfite + torta (g)	4,118	4,717	4,65	5,057	4,965	4,746	4,784	4,392	4,83	4,927

Ensaio 21

Tabela A21: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	431,5	549,2	627,6	608,0	568,8	666,8	666,8	666,8	686,5
30	490,3	745,3	1078,7	1157,2	1216,0	1157,2	1294,5	1235,6	1118,0	1294,5
60	568,8	1196,4	1510,2	1608,3	1667,1	1471,0	1529,8	1451,4	1529,8	1529,8
90	686,5	1529,8	1706,3	1765,2	1784,8	1745,6	1745,6	1627,9	1745,6	1745,6
120	823,8	1686,7	1843,6	1902,5	1902,5	1882,9	1902,5	1686,7	1882,9	1902,5
150	980,7	1784,8	1961,3	2039,8	2000,5	1980,9	1980,9	1863,3	2020,2	2059,4
180	1118,0	1902,5						1980,9		
210	1255,2	2000,5								
240	1372,9									
270	1529,8									
300	1647,5									
330	1706,3									
360	1863,3									
390	1961,3									
Filtro+torta (g)	423,04	424,02	424,16	424,52	424,72	424,37	424,32	424,41	424,5	424,79
Filtro após limp. (g)	421,95	422,51	422,6	422,94	422,85	422,89	422,88	422,86	422,89	422,96
Sulfite (g)	4,846	4,86	4,883	4,849	4,861	4,867	4,879	4,89	4,859	4,883
Sulfite + torta (g)	5,887	6,296	6,345	6,473	6,718	6,403	6,337	6,375	6,429	6,607

Ensaio 22

Tabela A22: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	745,3	823,8	863,0	941,4	961,0	1059,1	1059,1	1059,1	1157,2
30	333,4	2039,8	2235,9	2177,1	2530,1	1863,3	3040,0	3059,7	3020,4	3098,9
60	509,9	3432,3	3079,3	3569,6	3824,6	3275,4	3922,6	3961,9	3903,0	3844,2
90	863,0	3805,0	3805,0	3883,4		3844,2				
120	1274,9									
150	1784,8									
180	2412,4									
210	2902,8									
240	3275,4									
270	3785,3									
Filtro+torta (g)	422	422,69	422,95	423,46	423,3	423,63	423,7	423,31	423,29	423,1
Filtro após limp. (g)	421,23	421,73	422,07	422,3	422,32	422,43	422,29	422,29	422,37	422,38
Sulfite (g)	4,814	4,815	4,817	4,825	4,81	4,801	4,815	4,82	4,817	4,822
Sulfite + torta (g)	5,584	5,786	5,76	5,906	5,809	5,898	6,134	5,827	5,679	5,582

Ensaio 23

Tabela A23: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=1960\text{Pa}$.

Tempo(s)	Perda de carga (Pa)									
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5	Ciclo 6	Ciclo 7	Ciclo 8	Ciclo 9	Ciclo 10
0	235,4	725,7	813,9	843,4	921,8	941,4	1019,9	980,7	1039,5	1059,1
30	353,0	1873,1	2059,4	2177,1	2490,9	1863,3	2942,0	2961,6	2922,4	3098,9
60	490,3	3255,8	2981,2	3569,6	3736,3	3275,4	4020,7	4001,1	3903,0	3844,2
90	843,4	3530,4	3805,0	3824,6		3844,2				
120	1294,5									
150	1804,4									
180	2451,7									
210	2824,3									
240	3236,2									
270	3726,5									
300	41									
filtro Inicial (g)	418,18	421,23	421,73	422,07	422,3	422,32	422,43	422,29	422,29	422,37
Filtro+torta (g)	422	422,69	422,95	423,46	423,3	423,63	423,7	423,31	423,29	423,1
Filtro após limp. (g)	421,23	421,73	422,07	422,3	422,32	422,43	422,29	422,29	422,37	422,38
Sulfite (g)	4,814	4,815	4,817	4,825	4,81	4,801	4,815	4,82	4,817	4,822
Sulfite + torta (g)	5,584	5,786	5,76	5,906	5,809	5,898	6,134	5,827	5,679	5,582

APÊNDICE B

TAMANHO DOS PATCHES REMOVIDOS

Tabela B1: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 5 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 5		Ciclo 10	
Nº Patches:		Nº Patches:		Nº Patches:		Nº Patches:		Nº Patches:	
Objeto	Area	Objeto	Area	Objeto	Area	Objeto	Area	Objeto	Area
1	27,20	1	96,52	1	31,55	1	196,06	1	160,12
2	3,86	2	6,75	2	0,69			2	1,20
3	71,86	3	0,32	3	78,41				
4	5,97	4	0,33	4	0,18				
		5	8,44	5	0,54				
		6	3,91	6	0,20				
		7	5,24	7	2,31				
		8	0,48	8	2,36				
Área Total	108,90		121,99		116,24		196,06		161,33

Tabela B2: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 5		Ciclo 10	
Nº Patches:		Nº Patches:		Nº Patches:		Nº Patches:		Nº Patches:	
Objeto	Area	Objeto	Area	Objeto	Area	Objeto	Area	Objeto	Area
1	143,7	1	55,74	1	55,29	1	115,9431	1	161,7428
2	1,068	2	0,675	2	0,326	2	0,182359		
3	0,711	3	45,14	3	0,161	3	3,076912		
4	0,131	4	0,111	4	0,239	4	1,063536		
5	0,199	5	0,158	5	0,196	5	0,296797		
6	0,503	6	4,381	6	0,535	6	12,33217		
7	0,349	7	0,303	7	3,592				
8	0,467	8	0,227	8	28,54				
9	0,314	9	0,401	9	1,429				
10	3,068	10	0,282	10	0,255				
11	0,184	11	0,107	11	0,262				
12	0,101	12	0,401						
13	0,262	13	0,363						
14	0,272	14	1,618						
15	0,28	15	0,148						
16	0,142	16	0,469						
		17	0,316						
Área Total	151,7		110,8		90,82		132,8948		161,7428

Tabela B3: Dados obtidos do ensaio de filtração com o acrílico como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	138,47	61,54	0,07	40	0,03
			0,15	40	0,05
			0,35	20	0,06
			136,79	1,96	60,7
2	173,24	76,9	0,07	33,3	0,1
			0,15	33,3	0,3
			0,35	27,9	0,4
			171,24	5,5	76,1
3	147,24	65,44	0,07	48,4	0,02
			0,15	36,17	0,08
			0,35	12,76	0,09
			143,1	2,12	63,6
5	136,37	60,61	0,07	34,48	0,002
			0,15	34,48	0,003
			0,35	27,58	0,012
			132,92	3,44	59,01

Tabela B4: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 5 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	68	30,2	0,05	71,42	0,222
			2,05	14,28	4,552
			58,9	7,14	9,02
			38,6	31,17	17,16
2	71,1	31,6	0,025	31,17	0,26
			0,075	22,08	0,57
			0,55	35,06	6,6
			2,5	5,19	4,4
			7	5,19	12,44
			28,81	1,3	12,8
3	77,42	34,41	0,025	33,33	0,39
			0,075	19,05	0,67
			0,55	39,05	10,02
			2,5	5,71	6,66
			7,96	0,95	3,54
			17,56	0,95	7,81
			25,36	0,95	11,27
5	91,1	40,48	0,025	10,45	0,15
			0,075	24,63	1,1
			0,55	53,73	17,6
			2	7,46	8,8
			4,5	2,98	8
			33,74	0,75	14,99
10	93,02	41,34	0,025	17,03	0,34
			0,075	18,68	1,13
			0,55	56,59	25,18
			2	5,49	8,89
			4,5	1,1	4
			7,25	0,55	3,23
			20,69	0,55	9,2

Tabela B5: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s, velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	116,57	51,81	0,03	12,27	0,27
			0,075	39,26	2,13
			0,15	28,22	3,07
			0,35	12,88	3,27
			0,75	3,68	2
			1,5	2,45	2,67
			3,8	0,61	1,69
			85,13	0,61	37,83
2	138,48	61,55	0,03	16,67	0,23
			0,075	18,89	0,57
			0,15	17,78	1,07
			0,35	15,56	2,18
			0,75	10	3
			1,3	4,44	2,31
			2,5	4,44	4,44
			4,5	2,22	4
			5,5	2,22	4,89
			7	3,33	9,33
			10	3,33	13,33
35,62	1,11	15,83			
3	116,4	51,73	0,03	13,1	0,19
			0,075	13,69	0,36
			0,15	19,64	1,1
			0,35	26,19	2,93
			0,75	16,67	4,35
			1,5	7,74	4,33
			2,2	1,19	1,33
			81,12	1,19	36,05
5	118,04	52,46	0,02	2,9	0,053
			0,04	7,25	0,27
			0,075	18,84	1,3
			0,15	23,67	3,27
			0,25	17,87	4,11
			0,35	14,49	4,67
			0,75	8,69	6
			1,3	2,41	2,89
			2,1	0,97	1,87
			4	0,48	1,78
			6	0,97	5,33
9,5	0,48	4,22			
19	0,97	16,89			
10	94,3	41,91	0,025	8	0,57
			0,07	15,36	1,65
			0,075	26,7	5,1
			0,15	24,46	9,33
			0,25	12,04	7,67
			0,35	7,5	6,69
			0,75	4	7,67
			1,1	0,7	1,95
2,5	0,35	2,22			

Tabela B6: Dados obtidos do ensaio de filtração com o poliéster como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 15 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	167,87	74,61	0,06	29,41	0,4
			0,15	23,53	0,8
			0,35	23,52	1,87
			0,8	5,88	1,07
			1,6	13,72	4,98
			3,72	1,96	1,65
			144,55	1,96	64,24
2	149,97	66,65	0,03	11,2	0,19
			0,075	25,6	10,7
			0,15	24	2
			0,35	16,8	3,27
			0,75	12	5
			1,5	4,8	4
			2,25	2,4	3
			6,64	0,8	2,95
			8,19	0,8	3,64
			26,08	0,8	11,59
68,29	0,8	30,35			
3	152,67	67,85	0,04	3,45	0,035
			0,075	17,24	0,33
			0,15	36,21	1,4
			0,35	6,9	0,62
			0,75	13,79	2,67
			1,5	10,34	4
			2	1,72	0,89
			5,5	5,17	7,33
			16,94	1,72	7,53
			39,76	1,72	17,67
58,65	1,72	26,1			
5	176,45	78,42	0,035	11,86	0,22
			0,075	18,64	0,73
			0,15	15,25	1,2
			0,35	17,8	3,27
			0,75	13,6	5,33
			1,5	9,32	7,33
			2,5	4,24	5,56
			4	6,78	14,22
			21,29	0,85	9,46
			29,14	0,85	12,95
47,76	0,85	21,23			
10	126,66	56,3	0,035	21,1	1,29
			0,075	21,83	2,87
			0,15	20,3	5,33
			0,35	19,29	11,82
			0,75	10,41	13,67
			1,5	4,06	10,67
			2,5	2,54	11,11
4	0,51	3,56			

Tabela B7: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 5 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	124,25	55,23	0,06	22,8	0,6
			0,15	37,65	2,75
			0,35	28,6	4,14
			0,8	8,72	3,1
			2,99	4,7	6,3
			86,2	0,67	38,31
2	127,61	56,71	0,06	44,4	0,41
			0,7	27,27	3,74
			4,85	8,08	10,25
			93,25	1	41,44
3	113,92	50,6	0,06	34,9	0,18
			0,15	20,75	0,96
			0,35	15,09	1,62
			1	15,09	4,16
			3,29	11,32	10,7
			49,01	2,8	33,01
5	107,94	47,98	0,06	50	0,9
			0,15	22,7	1,71
			0,49	16,47	3,95
			1	6,8	3,68
			16,86	2,84	10,31
			49,01	0,57	27,29
10	130,64	58,06	0,06	63,04	0,78
			0,15	17,39	1,42
			0,49	14,13	3,08
			2,36	4,34	3,67
			88,55	0,89	49,12

Tabela B8: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	75,34	33,48	0,06	54,9	2,15
			0,15	32,6	3,9
			0,73	11,34	3,9
			49,89	1,06	23,49
2	94,61	42,04	0,06	31,16	0,79
			0,2	39,61	3,3
			1	24,67	6,8
			6,52	3,2	5,9
			57,12	0,65	25,38
3	102,61	45,6	0,06	55,4	1,92
			0,2	28,78	3,93
			1	13,68	7,97
			5,32	1,4	5,15
			57,12	0,7	26,67
5	155,82	69,25	0,06	42,3	0,85
			0,15	27,88	1,29
			1	24,03	3,4
			5,32	4,8	3,2
			136,84	0,96	60,81
10	152,48	67,7	0,06	57,9	0,7
			0,15	23,01	1,89
			1	18,25	3,15
			140,91	0,79	62,62

Tabela B9: Dados obtidos do ensaio de filtração com o polipropileno como meio filtrante, velocidade de filtração de 5 cm/s. velocidade de limpeza de 10 cm/s e $\Delta P_{\max}=3920\text{Pa}$.

Número do Ciclo	Área Total Removida	% da área do filtro	Distribuição de tamanho médio dos pedaços removidos (cm ²)	% dos pedaços removidos	% da área total removida
1	91,13	40,5	0,06	76,6	5,18
			0,15	15,26	4,02
			1	7,47	7,63
			3,7	0,156	1,64
			49,21	0,156	21,87
2	103,77	46,12	0,06	60,5	0,93
			0,2	26,11	1,97
			1	11,46	3,48
			2,6	1,27	1,85
			85,21	0,64	37,87
3	101,31	45,03	0,06	54,9	1,54
			0,2	29,81	1,54
			1	14,2	7,26
			10,52	0,77	5,5
			60,3	0,38	26,8