

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

**FILTRAÇÃO DE GASES: ESTUDO DA DEPOSIÇÃO DE
DIFERENTES TORTAS DE FILTRAÇÃO EM DIFERENTES
MEIOS FILTRANTES**

Karina Bassan Rodrigues

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos

Orientadora: Mônica Lopes Aguiar

São Carlos – SP
2006

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

R696fg

Rodrigues, Karina Bassan.

Filtração de gases: estudo da deposição de diferentes tortas de filtração em diferentes meios filtrantes / Karina Bassan Rodrigues. -- São Carlos : UFSCar, 2006.
230 p.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2006.

1. Filtração de gases. 2. Profundidade de penetração. 3. Filtros de tecido. I. Título.

CDD: 660.284245 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **KARINA BASSAN RODRIGUES**, APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 19 DE JUNHO DE 2006.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, PPG-EQ/UFSCar

Murilo Daniel de Mello Innocentini
DEQ/UNAERP

Nehemias Curvelo Pereira
DEQ/UEM

José Renato Coury
PPG-EQ/UFSCar

José Antônio Gonçalves da Silveira
PPG-EQ/UFSCar

Aos meus pais, Tiana e Cirilo,
pelo exemplo de perseverança.

AGRADECIMENTOS

Muitos foram os que me ajudaram e sinto se não forem lembrados como merecem. Eu não conseguiria exprimir em uma página o quanto sou grata a cada nome que se encontra neste pedacinho de papel. Como vai ficar muito longa, acho que além da minha mãe, ninguém mais vai ler. Mas vamos lá...

Em primeiro lugar a **Deus**, eu agradeço por ter me dado força nos momentos de desânimo, e por me mostrar que sempre posso mais;

Aos meus **pais**, que sempre estiveram ao meu lado com palavras de incentivo e por me estimularem com seu orgulho, espero que um dia ser digna de tanto amor;

Às minha irmãs, **Sarita** e **Graciela**, duas criaturas lindas e doces que eu quero tão bem; que são um exemplo para mim, e aos meus cunhados por tabela...

À minha **avó**, *in memoriam*; que deve estar olhando por mim de algum lugar;

À minha segunda mãe, Tia **Célia**, que apesar de ter ficado um pouco mais longe, está sempre pertinho de mim, torcendo para tudo dar certo, como meu Tio **Beto**; aos meus tios **Paulo** e **Cida**, por estarem ao lado da minha mãe, quando eu não podia estar; à todas as minhas primas e primos que amo tanto, em especial à **Tuti**, à **Maísa** e à **Pati**;

Aos meus padrinhos, **Marcos** e **Fifia**, e à minha quase prima **Paula**, pessoas de quem eu queria ter estado mais próxima, mas que sei que sempre poderei contar;

À minha amiga tão querida **Claudinha**, há quase vinte anos, sempre companheira e confidente;

À grande amiga **Érica Tieni**, que dispensa comentários, pela companhia em casa, na academia, na federal, no Bar do Pascoal, nos concursos, nos estudos, enfim... pior (ou melhor) que casamento... Trabalhando e morando juntas, sobrevivemos;

Ao pessoal do posto Brasil, pela descontração dos feriados;

Aos amigos do laboratório: **Juliana**, **Carol**, **Edmundo**, pelas palavras de ponderação; **Felicetti**, pela bagunça e pelas risadas; **Vanessa**; **Érica Tognetti**; **Érica Tieni**, pelas discussões filosóficas a respeito dos nossos resultados, pela ajuda em muitos ensaios e pela paciência comigo; **Lissandra Ito**, conterrânea, que me ajudou a por o equipamento pra funcionar, me ensinou toda a técnica de tratamento de amostra, e pela amizade, que ninguém punha fé que iria vingar; **Simone**, **Edinalda**, pela ajuda na teoria de muitos pontos e pela amizade que construímos;

À **Wânia** Cristinelli pela impagável ajuda no tratamento das amostras, sem contar na amizade que também é impagável;

Ao **Leonardo** Arrieche, um grande amigo que felizmente tive tempo de descobrir antes de ir embora;

À **Raquel** Bastiani, a quem sempre serei grata, sempre pronta a ajudar;

À **Sania** Maria de Lima, grande amiga e companheira, desde os tempos da faculdade;

À meus amigos que moraram comigo e dividiram uma parte boa da minha estada em São Carlos e fizeram dela uma grande diversão: **Madá, Grezielli, Laura** (como eu ria), **Guto, Érica Tieni** (de novo!)... Foram momentos tão bons que vou guardar para sempre... Não posso deixar de falar da **Rosilene**, essa pessoa tão querida, que tem um coração que não cabe no peito;

À uma turminha especial: **Darci, Lili, Lílian, Priscila, Rafael, Julieta, Swami, Sheila** (por um convite certo na hora mais certa), **Iveti, Lívia** (nem falo o quanto aprendi com ela!) e em especial à **Larissa**, que me ajudou a crescer muito profissionalmente e espiritualmente, que me apareceu na vida como um presente;

Às minhas amigas eternas, de mais de uma década: **Cidinha, Lika, Silvana, Rejane** e também à **Drica**;

Ao **Ricardo**, pelo carinho e felicidade;

É, claro, à minha mais que querida orientadora, **Mônica**, que me deu uma grande chance me orientando e me acolheu quase como uma filha, de quem tomei bronca e recebi conselhos, com quem já dei risadas e já chorei, com quem aprendi que a nossa relação não tinha que ser apenas profissional, ela era muito mais que isso, e uma pessoa a quem respeito muito e espero nunca ter decepcionado... A pessoa que me ajudou a tornar um projeto de oito páginas neste trabalho...

Aos professores da área, com quem também muito aprendi, em especial ao **Zeção** e ao **Zé Antonio**, pela ajuda na discussão de muitos pontos do trabalho;

Ao **Oscar**, que me ajudou muito com o equipamento, e com quem dei muita risada na hora do café, à **Thaís**, por ter me ajudado a dar cabo das últimas amostras; à **Clarice** e à **Sandra**, técnicas do DEQ; ao **Cleber**, do CCDM, pelas horas intermináveis de análise no MEV, que resultaram em uma amizade;

À Gino Cacciari, pelo fornecimento dos tecidos;

Ao Cnpq, pelo auxílio financeiro

“Pedi e vos será dado,
Buscai e achareis,
Batei e abrir-se-vos-á.
Porque todo aquele que pede recebe,
E quem busca acha,
E a quem bate, abrir-se-lhe-á”

Lucas, 11 9:10

SUMARIO

	LISTADE FIGURAS	i
	LISTA DE TABELAS	vi
	LISTA DE SIMBOLOS	ix
	RESUMO	xi
	ABSTRACT	xii
1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Classificação e Fabricação dos Tecidos	6
2.1.1	Métodos de Tratamento de Tecidos ou Finalização	13
2.1.2	Captura de Partículas	16
2.2	Operação da Filtração	20
2.2.1	A Formação da Torta	23
2.2.2	Mecanismos de Limpeza	24
2.2.3	Critério de Desempenho	30
2.3	Aspectos Relevantes na Filtração	30
2.3.1	Queda de Pressão na Filtração	31
2.3.2	Fração Limpa	37
2.3.3	Densidade de Empacotamento (α)	38
2.3.4	Umidade	38
2.3.5	Velocidade de Filtração	39
2.3.6	Carga Mássica Aplicada ou Concentração de Entrada	41
2.3.7	Porosidade do Meio Filtrante e Diâmetro de Poros	41
2.3.8	Porosidade de Tortas de Filtração	43
2.3.9	Diâmetro e Forma das Partículas	43
2.3.10	Diâmetro de Fibras	45
2.3.11	Efeitos de Cargas Eletrostáticas	46
2.3.12	Estudos Comparativos entre Diferentes Tecidos	46
2.3.13	A Penetração de Partículas no Interior dos Meios Filtrantes	49
3	MATERIALE METODOS	52
3.1	Descrição Geral	52
3.2	Materiais Pulverulentos	53
3.2.1	Caracterização dos Materiais Pulverulentos	53
3.3	Meios Filtrantes	56
3.3.1	Caracterização dos Meios Filtrantes	56
3.4	Equipamento de Filtração e Coleta de Dados	58
3.4.1	Equipamento de Filtração	58
3.4.2	Alimentação de Pó	60
3.4.3	Aquisição de Dados	63
3.5	Procedimento Experimental	64
3.5.1	Ensaio Gerais – Comparação entre os Tecidos	64
3.5.2	Comparação entre os Materiais Pulverulentos	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1	Ensaio Preliminares	69
4.2	Caracterização dos Meios Filtrantes	76
4.3	Ensaio de Filtração Acrílico e Rocha Fina (3,71 μm)	78
4.4	Ensaio de Filtração Polipropileno e Rocha Fina (3,71 μm)	91

4.5	Ensaio de Filtração Poliéster Tratado e Rocha Fina (3,71 μm)	101
4.6	Ensaio de Filtração Poliéster não Tratado e Rocha Fina (3,71 μm)	110
4.7	Comparação entre os Meios Filtrantes e Rocha Fina	120
4.8	Ensaio de Filtração - Poliéster Tratado e Polvilho (8,67 μm)	136
4.9	Ensaio de Filtração – Poliéster Não Tratado e Polvilho (8,67 μm)	144
4.10	Comparação entre a Presença e Ausência de Tratamento dos Meios Filtrantes e entre a Forma e Distribuição Granulométrica das Partículas	152
4.11	Ensaio de Filtração – Acrílico e Rocha Grossa (14,67 μm) $\Delta P_{\text{MAX}} = 100\text{mmH}_2\text{O}$	167
4.12	Comparação entre a Filtração com partículas de Tamanhos Diferentes	177
4.13	Ensaio de Filtração – Acrílico e Rocha Grossa $\Delta P_{\text{MAX}} = 300\text{mmH}_2\text{O}$	187
4.14	Ensaio de Filtração – Comparação entre Filtrações com Diferentes Perdas de Carga Máxima	197
4.15	Avaliação dos Mecanismos de Captura para cada Série de Experimentos – Comparação com a Literatura.	205
5	CONCLUSÕES	209
6	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	213
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	214
	ANEXO A	224
	ANEXO B	229

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Classificação de tecidos segundo a ABRAFAS	7
Figura 2.2: Tipos de torcida utilizados na confecção de fios.	8
Figura 2.3: Tipos de tecidos trançados.	9
Figura 2.4: Tipos de confecção de fios sintéticos.	11
Figura 2.5: Tipos de tramas: a) trama plana com fios multifilamentosos; b) trama sarja 2/1, com fios estirados e fibras cortadas (staple spun); c) feltro agulhado.	12
Figura 2.6: Desenho esquemático da captura por interceptação direta	16
Figura 2.7: Desenho esquemático da captura por impactação inercial.	18
Figura 2.8: Desenho esquemático da captura por difusão.	19
Figura 2.9: Desenho esquemático da captura por ação gravitacional.	19
Figura 2.10: Interação dos mecanismos de coleta e eficiência resultante dos mesmos.	20
Figura 2.11: Ilustração da formação de dendritos no interior dos meios filtrantes e sua variação conforme o mecanismo de coleta predominante.	22
Figura 2.12: Determinação do ponto de colmatação do meio	23
Figura 2.13 Métodos de limpeza de filtros de tecido.	26
Figura 2.14: Ciclos de filtração e limpeza por ar reverso	27
Figura 2.15: Determinação do arraste efetivo nos estágios iniciais da filtração.	36
Figura 2.16: Eficiência de coleta em função da velocidade de filtração e diâmetro de partículas	44
Figura 3.1: Microfotografias dos materiais pulverulentos utilizados.	55
Figura 3.2: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados.	55
Figura 3.3: Exemplo de determinação da porosidade superficial via microscópio óptico: a) imagem original; b) imagem tratada para a determinação da área.	57
Figura 3.4: Esquema geral do equipamento de filtração e limpeza.	59
Figura 3.5: Detalhamento do sistema de alimentação de pó.	60
Figura 3.6: Esquema da caixa de filtração e limpeza.	61
Figura 3.7: Equipamento no modo filtrando.	62
Figura 3.8: Equipamento no modo limpando.	62
Figura 3.9: Partes da torta removidas para análise em MEV ou microscopia ótica.	65
Figura 3.10: Aspecto da limpeza aos pedaços em uma amostra de tecido já endurecida.	66
Figura 3.11: Esquema de cinco fotos tiradas do interior do meio filtrante, em seqüência, para determinação da profundidade de penetração, com aumento de 2000X.	66
Figura 3.12: Comparação entre a microfotografia da foto original (a) e a binarizada pelo software (b).	67
Figura 4.1: Microscopia eletrônica de varredura dos tecidos testados. Aumento de 50X.	70
Figura 4.2: Ensaios preliminares nos tecidos.	71
Figura 4.3: Ampliação das curvas de filtração dos ensaios preliminares.	73
Figura 4.4: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração do Acrílico e rocha fina.	79
Figura 4.5: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma .	82

Figura 4.6: Perfil da variação de perda de carga residual para os ensaios com Acrílico e rocha fina.	83
Figura 4.7: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Acrílico e rocha fina.	83
Figura 4.8: Perfil da fração de massa removida da torta, para o Acrílico e rocha fina.	84
Figura 4.9: Seção transversal do acrílico em diferentes ciclos	86
Figura 4.10: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Acrílico.	89
Figura 4.11: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o Polipropileno e rocha fina.	91
Figura 4.12 : Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o PP e rocha fina.	93
Figura 4.13 : Perfil da perda de carga residual para os experimentos com Polipropileno.	93
Figura 4.14: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Polipropileno e rocha fina.	94
Figura 4.15: Perfil da fração removida de torta, após a limpeza, para o Polipropileno e rocha fina.	95
Figura 4.16: Seção transversal do polipropileno em diferentes ciclos	96
Figura 4.17: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Polipropileno e rocha fina.	99
Figura 4.18: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o Poliéster tratado e rocha fina.	101
Figura 4.19: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o Poliéster tratado e rocha fina.	103
Figura 4.20 : Perfil da variação da perda de carga residual para os ensaios com Poliéster tratado e rocha fina.	104
Figura 4.21: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Poliéster tratado e rocha fina.	104
Figura 4.22: Perfil da fração removida da torta ,após a limpeza, para o Poliéster tratado e rocha fina.	105
Figura 4.23: Seção transversal do poliéster tratado em diferentes ciclos	106
Figura 4.24: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster tratado e rocha fina.	108
Figura 4.25: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o poliéster sem tratamento e rocha fina.	110
Figura 4.26 : Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o Poliéster sem tratamento e rocha fina.	112
Figura 4.27 : Perfil da variação da perda de carga residual para os ensaios com Poliéster não tratado e rocha fina.	113
Figura 4.28: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Poliéster não tratado e rocha fina.	113
Figura 4.29: Perfil da fração de massa removida da torta, após a limpeza para o Poliéster não tratado e rocha fina.	114
Figura 4.30: Seção transversal do poliéster não tratado em diferentes ciclos	115
Figura 4.31: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster não tratado e rocha fina.	118

Figura 4.32: Gráfico comparativo dos dez ciclos do Ensaio 10, em termos de carga mássica acumulada, para os diferentes tecidos. _____	120
Figura 4.33: Curvas comparativas da resistência específica da torta média para os tecidos. _____	122
Figura 4.34: Massa de material pulverulento removida pela limpeza nos tecidos. ____	122
Figura 4.35: Total de partículas coletadas em cada coluna analisada, por ciclo. ____	125
Figura 4.36: Gráfico comparativo do Ensaio 10 de cada tecido, para a perda de carga residual e massa retida acumulada, para diferentes tecidos. _____	126
Figura 4.37: Variação da perda de carga residual com a massa retida em cada ciclo de filtração para os tecidos analisados. _____	127
Figura 4.38: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração. ____	128
Figura 4.39: Tendência da variação do número médio de partículas com a profundidade do tecido. _____	130
Figura 4.40: Imagem da superfície de um tecido após a remoção. a) Aumento de 50x; b) Aumento de 200x. _____	132
Figura 4.41: Profundidade de penetração dos experimentos com rocha fina. ____	133
Figura 4.42: Perfil da perda de carga para os dez ciclos de filtração para o Poliéster tratado com polvilho. _____	136
Figura 4.43: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o Poliéster tratado e polvilho. _____	138
Figura 4.44: Perfil da variação de perda de carga residual para os ensaios com Poliéster tratado e polvilho. _____	139
Figura 4.45: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Poliéster tratado e polvilho. _____	139
Figura 4.46: Perfil da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para o Poliéster tratado e polvilho. _____	140
Figura 4.47: Seção transversal do poliéster tratado em diferentes ciclos para o polvilho. Aumento de 200X _____	142
Figura 4.48: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster tratado e polvilho. _____	144
Figura 4.49: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o poliéster sem tratamento com polvilho. (!) Ensaio 01; (,) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (Λ) Ensaio 05; (□) Ensaio 10. _____	145
Figura 4.50: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o Poliéster não tratado e polvilho. _____	146
Figura 4.51: Perfil da variação de perda de carga residual de cada ciclo de filtração para o poliéster não tratado e polvilho. _____	147
Figura 4.52: Perda de carga residual com a massa retida acumulada nos experimentos com PNT e polvilho. _____	147
Figura 4.53: Perfil da fração de massa removida após a limpeza para o poliéster sem tratamento e polvilho. _____	148
Figura 4.54: Seção transversal do poliéster não tratado em diferentes ciclos para o polvilho. Aumento de 200 X. _____	150
Figura 4.55: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster não tratado e polvilho. _____	152
Figura 4.56 : Gráfico comparativo das curvas de filtração do ensaio 10, entre o poliéster tratado e não tratado filtrando rocha fosfática fina e polvilho. _____	153

Figura 4.57: Primeiro ciclo dos experimentos com PT e PNT, com rocha fosfática fina e polvilho. _____	154
Figura 4.58: Comparação entre a resistência específica média da torta entre os experimentos com tecidos tratados e não tratados para a rocha fina e o polvilho doce. _____	156
Figura 4.59: Massa de material pulverulento retida acumulada e removida para os experimentos com rocha fina e polvilho. _____	156
Figura 4.60: Total de partículas coletadas em cada coluna analisada, por ciclo, para os experimentos com tecidos tratados e sem tratamento, filtrando rocha fina e polvilho. _____	158
Figura 4.61: Curva média da variação de perda de carga residual de cada experimento. _____	161
Figura 4.62: Gráfico comparativo do Ensaio 10 dos tecidos tratados e não tratados filtrando rocha fina e polvilho. _____	162
Figura 4.63: Comparação do comportamento da perda de carga residual com a massa retida para os tecidos com e sem tratamento filtrando rocha fina e polvilho. _____	163
Figura 4.64: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração. _____	164
Figura 4.65: Curvas da variação do número médio de partículas com a profundidade do tecido para o poliéster com e sem tratamento, filtrando rocha fina e polvilho. _____	165
Figura 4.66: Profundidade de penetração atingida em cada coluna analisada para os ensaios com PT e PNT com rocha fina e polvilho. _____	166
Figura 4.67: Perfil da perda de carga para os dez ciclos de filtração para o acrílico com a rocha grossa, 100 mmH ₂ O. _____	167
Figura 4.68: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o Acrílico filtrando rocha grossa, 100 mmH ₂ O. _____	169
Figura 4.69: Perfil da variação de perda de carga residual de cada ciclo de filtração para o Acrílico filtrando rocha grossa, 100 mmH ₂ O. _____	169
Figura 4.70: Relação da perda de carga residual com a massa retida acumulada para o AC e rocha grossa. _____	170
Figura 4.71: Perfil da variação de perda de carga residual de cada ciclo de filtração para o Acrílico filtrando rocha grossa, 100 mmH ₂ O. _____	171
Figura 4.72: Seção transversal do Acrílico filtrando rocha grossa, em diferentes ciclos, 100 mmH ₂ O. _____	172
Figura 4.73: Variação do número de partículas com o número de ciclos para o Acrílico filtrando rocha grossa. _____	175
Figura 4.74: Curvas comparativas do Ensaio 10 da rocha fosfática com diferentes diâmetros e 100 mmH ₂ O. _____	177
Figura 4.75: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha grossa e rocha fina. _____	179
Figura 4.76: Massa de material pulverulento removida e retida acumulada para a rocha fina e grossa em Acrílico. _____	179
Figura 4.77: Número total de partículas coletadas em cada coluna analisada para rocha fina e grossa em Acrílico. _____	180
Figura 4.78: Perfil da variação de perda de carga residual média de cada ciclo de filtração para a rocha fina e grossa em Acrílico. _____	182

Figura 4.79: Gráfico comparativo do Ensaio 10 de cada tecido para a rocha fina e grossa em acrílico. _____	183
Figura 4.80: Variação da perda de carga residual com a massa retida acumulada para os experimentos com Acrílico e rochas fina e grossa, até 100 mmH ₂ O ____	184
Figura 4.81: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração. ____	184
Figura 4.82: Variação do número médio de partículas em função da profundidade de penetração para a rocha fina e a rocha grossa em acrílico, com o desvio padrão. _____	185
Figura 4.83: Comparação entre da variação dos diâmetros médios dos experimentos com rocha fina (a) e grossa (b) em Acrílico. _____	186
Figura 4.84: Profundidade de penetração com o número de ciclos para cada coluna analisada do Acrílico com rocha grossa e fina. _____	186
Figura 4.85: Perfil da perda de carga para os dez ciclos de filtração para o acrílico com a rocha grossa, 300 mmH ₂ O. _____	187
Figura 4.86: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para o Acrílico filtrando rocha grossa, 300 mmH ₂ O. _____	189
Figura 4.87: Perfil da variação da perda de carga residual com o número de ciclos para os experimentos de AC com rocha grossa e 300mmH ₂ O. _____	189
Figura 4.88: Variação da perda de carga residual com a massa retida acumulada para o AC com rocha grossa até 300mmH ₂ O. _____	190
Figura 4.89: Perfil da fração de massa removida da torta, após a limpeza para o Acrílico e rocha grossa, 300 mmH ₂ O. _____	190
Figura 4.90: Seção transversal do Acrílico filtrando rocha grossa até 300 mmH ₂ O, em diferentes ciclos. _____	192
Figura 4.91: Variação do número de partículas com o número de ciclos para o Acrílico filtrando rocha grossa até 300 mmH ₂ O. _____	195
Figura 4.92: Comparação das curvas de filtração entre os experimentos em AC e rocha grossa com 100 e 300 mmH ₂ O. _____	197
Figura 4.93: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para a rocha grossa e fina em Acrílico. _____	198
Figura 4.94: Número total de partículas coletadas por camada analisada para o Acrílico e rocha grossa, até 100 e 300 mmH ₂ O. _____	199
Figura 4.95: Perfil da variação de perda de carga residual média de cada ciclo de filtração para a perda de carga máxima de 100 e 300 mmH ₂ O. _____	200
Figura 4.96: Comparação entre a variação das resistências específicas da torta para as diferentes perdas de carga máxima. _____	201
Figura 4.97: Variação da perda de carga residual com a massa retida para os experimentos com diferentes perdas de carga máxima. _____	201
Figura 4.98: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para: a) AC e rocha grossa, 100 mmH ₂ O, b) AC e rocha grossa, 300 mmH ₂ O. ____	202
Figura 4.99: Imagem geral da amostra do décimo ciclo do acrílico com a rocha grossa em: a) 100 mm H ₂ O; b) 300 mmH ₂ O. Aumento de 50 X. _____	203
Figura 4.100: Tendência da variação do número de partículas com a profundidade de penetração do Acrílico, para rocha grossa até 100 e 300 mmH ₂ O. _____	204
Figura 4.101: Profundidade de penetração dos experimentos com acrílico e rocha grossa com diferentes perdas de carga máximas. _____	204
Figura 4.102: Diferença no diâmetro médio de partículas coletadas por camada por ciclo para o Acrílico e rocha grossa. _____	205

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 Tipos de suspensão de material particulado _____	2
Tabela 2.1: Tecidos utilizados como meios filtrantes e suas propriedades. _____	15
Tabela 2.2: Comparação entre alguns métodos de limpeza _____	25
Tabela 3.1: Características dos materiais pulverulentos utilizados. _____	54
Tabela 3.2: Descrição dos meio filtrantes empregados (dados do fornecedor). _____	56
Tabela 3.3: Designação dos ensaios realizados. _____	65
Tabela 4.1: Determinação da resistência específica das tortas de filtração dos ensaios preliminares. _____	75
Tabela 4.2: Caracterização dos meios filtrantes _____	77
Tabela 4.3: Variação da massa coletada média com o número de ciclos para o Acrílico e rocha fina. _____	80
Tabela 4.4: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha fina. _____	82
Tabela 4.5: Penetração de partículas de rocha fina no Acrílico: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido. _____	87
Tabela 4.6: Desvio padrão do diâmetro de partículas em cada camada analisada do Acrílico. _____	88
Tabela 4.7: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Acrílico e rocha fina. _____	90
Tabela 4.8: Variação da massa filtrada média com o número de ciclos para o polipropileno _____	92
Tabela 4.9: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Polipropileno e rocha fina. _____	92
Tabela 4.10: Penetração de partículas de rocha fina no Polipropileno: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido. _____	97
Tabela 4.11: Desvio padrão do diâmetro de partículas do Polipropileno. _____	98
Tabela 4.12: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Polipropileno e rocha fina. _____	100
Tabela 4.13: Variação da massa coletada média com o número de ciclos para o poliéster tratado. _____	102
Tabela 4.14: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaio com Poliéster tratado e rocha fina. _____	103
Tabela 4.15: Penetração de partículas de rocha fina no Poliéster tratado: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido. _____	106
Tabela 4.16: Desvio padrão do diâmetro de partículas do Poliéster tratado. _____	107
Tabela 4.17: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Poliéster tratado e rocha fina. _____	109
Tabela 4.18: Variação da massa filtrada média com o número de ciclos para o poliéster não tratado e rocha fina. _____	111
Tabela 4.19: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Poliéster sem tratamento e rocha fina. _____	112
Tabela 4.20: Penetração de partículas de rocha fina no Poliéster não tratado: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido. _____	116

Tabela 4.21: Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fina em Poliéster sem tratamento. _____	117
Tabela 4.22: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Poliéster não tratado e rocha fina. _____	119
Tabela 4.23: Ponto de colmatação médio determinado para cada os ensaios de cada tecido estudado. _____	121
Tabela 4.24: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os tecidos analisados. _____	123
Tabela 4.25: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os tecidos analisados. _____	126
Tabela 4.26: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis. _____	135
Tabela 4.27: Comparação da vazão de de pó média coletada em cada tecido. _____	135
Tabela 4.28: Variação da massa coletada média com o número de ciclos do Poliéster tratado e polvilho. _____	137
Tabela 4.29: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Poliéster tratado e polvilho. _____	138
Tabela 4.30: Penetração de partículas no Poliéster tratado: número de partículas com a profundidade do tecido, filtrando polvilho. _____	143
Tabela 4.31: Variação da massa coletada média do PNT com polvilho. _____	145
Tabela 4.32: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Poliéster não tratado e polvilho. _____	146
Tabela 4.33: Penetração de partículas no Poliéster tratado: número de partículas com a profundidade do tecido, filtrando polvilho. _____	151
Tabela 4.34: Ponto de colmatação médio determinado para cada um dos ensaios de cada tecido e material pulverulento estudados. _____	153
Tabela 4.35: Variação da massa coletada média para o PT e PNT com rocha fina e com polvilho. _____	155
Tabela 4.36: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os tecidos analisados com rocha fina e polvilho. _____	157
Tabela 4.37: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis. _____	160
Tabela 4.38: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os tecidos analisados. _____	161
Tabela 4.39: Massa coletada em cada ciclo para o experimento com Acrílico e rocha grossa, filtrando até 100 mmH ₂ O. _____	168
Tabela 4.40: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha grossa, até 100 mmH ₂ O. _____	168
Tabela 4.41: Penetração de partículas de rocha grossa no Acrílico: diâmetro de partículas com a profundidade do tecido. _____	173
Tabela 4.42: Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha grossa em cada camada analisada do Acrílico. _____	174
Tabela 4.43: Valores do número de partículas retidas em cada camada do Acrílico e rocha grossa com ΔP máx de 100 mmH ₂ O. _____	176
Tabela 4.44: Comparação dos valores de massa média coletada em cada ciclo para os experimentos com Acrílico com as rochas grossa e fina, 100 mm H ₂ O. _____	178
Tabela 4.45: Ponto de colmatação médio determinado para cada os ensaios de cada tecido estudado. _____	178
Tabela 4.46: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os materiais analisados. _____	180

Tabela 4.47: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis.	181
Tabela 4.48: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os materiais analisados.	183
Tabela 4.49: Massa coletada em cada ciclo para os experimentos com Acrílico e rocha grossa a 300 mmH ₂ O.	188
Tabela 4.50: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha grossa 300 mmH ₂ O.	188
Tabela 4.51: Penetração de partículas de rocha grossa em Acrílico: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.	193
Tabela 4.52: Desvio padrão do diâmetro de partículas da rocha grossa em Acrílico filtrando até 300 mmH ₂ O.	194
Tabela 4.53: Valores do número de partículas retidas em cada camada do Acrílico e rocha grossa, até 300 mmH ₂ O.	196
Tabela 4.54: Massa coletada em cada ciclo para os experimentos com Acrílico.	198
Tabela 4.55: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os experimentos com AC em diferentes perdas de carga máximas.	199
Tabela 4.56: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os tecidos analisados.	200
Tabela 4.57: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis.	206

LISTA DE SIMBOLOS

- A – área superficial da torta [L^2]
 CM - carga mássica de pó [$M.L^{-2}.t^{-1}$]
 D – coeficiente difusional das partículas [$L^2.t^{-1}$]
 d_p – diâmetro da partícula [L]
 d_f – diâmetro das fibras [L]
 Fo - número de Forcheimmer, adimensional
 f_{mr} - fração de massa removida, adimensional
 k_l –permeabilidade do meio poroso [L^2]
 K_l – resistência do meio filtrante [$M.L^{-2}.t^{-1}$]
 k_2 – constante não darciana [L]
 K_2 – resistência específica da torta [$.t^{-1}$]
 L – espessura do meio poroso [L]
 L' – espessura da torta [L]
 M - massa de torta depositada [M]
 M_d - massa despreendida na limpeza [M]
 M_t - massa total de pó no filtro, após a filtração [M]
 m_f - densidade mássica por área do filtro [$M.L^{-2}$]
 P - pressão em que V , ρ e μ são medidos e calculados [$M.L.t^{-2}$]
 Pe – número de Peclet, adimensional
 P_e - pressão na entrada da amostra sob ensaio [$M.L.t^{-2}$]
 P_s - pressão na saída da amostra sob ensaio [$M.L.t^{-2}$]
 Q – vazão mássica de pó [$M.t^{-1}$]
 R – adimensional que determina a influência da impactação direta
 S - arraste efetivo [$M.L^{-1}.t^{-1}$]
 S_E - arraste, em um ponto qualquer nas condições iniciais de filtração [$M.L^{-1}.t^{-1}$]
 t – tempo de filtração [t]
 V – velocidade do fluido [$M.t^{-1}$]

V_f – velocidade de filtração [$M.t^{-1}$]

V_p – velocidade do fluido nos poros do tecido [$M.t^{-1}$]

W – massa de pó depositada por unidade de área [$M.L^{-2}$]

W_R - massa residual de pó por unidade de área [$M.L^{-2}$]

α - densidade de empacotamento do filtro, adimensional

α_p - densidade de empacotamento da torta, adimensional

ΔP - perda de carga [$M.L.t^{-2}$].

ΔP_T - perda de carga total de filtração [$M.L.t^{-2}$].

ΔP_M - queda de pressão do meio filtrante [$M.L.t^{-2}$].

ΔP_C - queda de pressão da torta [$M.L.t^{-2}$].

ΔP_m = perda de carga residual medida experimentalmente após a regeneração do filtro,
[$M.L.t^{-2}$]

ΔP_c = perda de carga comparativa à massa de pó separada durante a formação da torta,
[$M.L.t^{-2}$]

A - fator de rearranjo, adimensional

ε - porosidade do meio filtrante, adimensional

ε_c - porosidade da torta de filtração, adimensional

ε_t - porosidade total da amostra, adimensional

ρ – densidade do fluido [$M.L^{-3}$]

ρ_p – densidade da partícula [$M.L^{-3}$]

ρ_f = densidade da fibra [$M.L^{-3}$]

μ - viscosidade do gás [$M.L^{-1}.t^{-2}$]

RESUMO

A presença de partículas no interior do meio filtrante, após a limpeza, colabora significativamente para o aumento da perda de carga do ciclo subsequente. A forma como estas partículas se acomodam, no entanto, não é ainda claramente conhecida, assim como seu impacto no desempenho dos meios filtrantes. Desta forma, este trabalho se propõe a verificar a disposição de diferentes partículas em meios filtrantes com diferentes propriedades, a fim de estudar a profundidade de penetração no interior dos filtros, após a limpeza, bem como a variação granulométrica ao longo do interior dos mesmos. Além disso, faz parte do escopo deste trabalho verificar a relação deste comportamento com as demais características da filtração de cada tecido, como o desenvolvimento da perda de carga residual, massa removida e retida no filtro após a limpeza, e eficiência de remoção. Para os experimentos empregou-se três diferentes materiais pulverulentos, com diferentes tamanhos e diferentes distribuições granulométricas e formas diferentes: a rocha fosfática fina, com diâmetro médio de Stokes de 3,71 μm e ampla distribuição, a rocha fosfática grossa, com diâmetro médio de Stokes de 14,67 μm e ampla distribuição e o polvilho doce, com diâmetro médio de Stokes de 8,67 μm , forma quase esférica e distribuição estreita. Observou-se, apesar da heterogeneidade do meio filtrante, que houve um acúmulo de partículas nas camadas superiores do tecido, que diminuía com a profundidade. No entanto, não houve tendência da profundidade de penetração nem do número e diâmetro das partículas variarem com o número de ciclos. Verificou-se que, para o tecido de polipropileno, com menor permeabilidade e porosidade, houve menor retenção de partículas após a limpeza, mas perda de carga residual superior e ciclos de filtração mais curtos, o que pôde ser associado a uma menor profundidade de penetração, através das microscopias realizadas. A comparação dos tecidos de poliéster tratado e não tratado evidenciaram a maior massa retida no tecido sem tratamento, resultando em um maior ciclo de filtração nos ciclos iniciais, tanto para a rocha fina quanto para o polvilho. No entanto, o desempenho foi significativamente prejudicado nos ciclos seguintes, de modo a tornar o tecido menos indicado que os demais, com perdas de carga residuais superiores e menores eficiências de remoção de partículas. Notou-se que o material com distribuição

granulométrica mais estreita e com formato quase esférico apresentou ciclos de filtração mais homogêneos e longos, apesar dos maiores valores de massa retida, e maior profundidade de penetração, o que sugere que a torta formada possuía melhor acomodação de partículas. O aumento do diâmetro de partículas da rocha grossa resultou em maior profundidade de penetração e maior massa retida, mas em perda de carga residual semelhante, sendo que o período de filtração foi mais longo, o que significou que a torta constituída por partículas maiores ofereceu melhores condições de filtração e menor resistência específica. No entanto, a profundidade de penetração foi maior para a rocha grossa, sendo a intensidade desta penetração semelhante para os dois diâmetros. O aumento da perda de carga máxima admitida resultou em uma maior massa retida e maior perda de carga residual. No entanto, nada se pode afirmar a respeito do número total de partículas coletado por camada analisada, sendo que o valor médio em cada camada foi bastante próximo. Para a maior perda de carga máxima a profundidade de penetração também foi maior, assim como a resistência específica da torta, resultado da maior pressão de filtração.

ABSTRACT

The particle retention inside a filter medium, after cleaning, significantly improves the initial pressure drop during the subsequent cycle, that is, the residual pressure drop. However, the way as these particles accommodate inside the filter isn't still very clear, as well as, its impact on filtering performance. This work aims to verify the spatial disposal of different particles inside filtration media with different properties, in order to study the penetration depth, after cleaning, as well as the particle size variations from the cake-filter interface to the filtration bulk. Moreover, the objective of this research was to verify the relation between particle penetration behavior and other filtration characteristics for each fabric tested, like the development of residual pressure drop, retained and removed mass after cleaning, and removal efficiency. Three different kinds of powder materials were used for the experiments, varying particle size, granulometric distribution and particle shape: fine phosphoric rock dust, with an average Stokes diameter of 3.71 μm , irregular shape and wide granulometric distribution, coarse phosphoric rock dust, with an average Stokes diameter of 14.67 μm , irregular shape and wide granulometric distribution and tapioca flour, with average Stokes diameter of 8.67 μm , almost spherical shaped, and narrow granulometric distribution. It was observed, despite of the filter media heterogeneity, a particle accumulation in the upward layers of the fabric, decreasing as a function of depth. However, the penetration depth, amount of particles and particle diameter didn't vary according to the number of cycles. It was verified that, the polypropylene fabric, which has low values of permeability and porosity, presented lower particle retention values after cleaning, higher residual pressure drop and shorter filtration cycles, what could be associated with a superficial penetration, according to the microscopy tests carried out. The comparison made between treated and untreated polyester needle felts showed a greater retained mass in the untreated fabric, what resulted in a longer filtration cycle during the beginning of the process, making no difference when fine rock or tapioca flour were used. However, the filtration performance was significantly prejudiced during the following cycles, with higher residual pressure drop and lower particle efficiency removal, what turned the fabric less suitable than the other ones. The results showed that the material presenting narrower granulometric distribution and almost spherical shaped had more

homogeneous and long filtration cycles, despite of the greater values of retained mass and depth of penetration, what suggests the better accommodation of particles in the filter cake. The increase in the coarse rock particle diameter resulted in a deeper penetration and a greater retained mass, but similar residual pressure drop, with longer filtration cycles, what meant that the cake formed by greater particles offered better filtration conditions and less specific cake resistance. However, the penetration was deeper for the coarse rock, being the penetration intensity similar for the two rock diameters tested. The increase of maximum pressure drop resulted in a greater retained mass and a greater residual pressure drop. However, nothing could be assured about the total amount of particles collected from each analyzed layer, because the average values in each layer were comparable in magnitude. For a higher maximum pressure drop, the penetration was deeper, as well as the specific resistance of the filter cake, resulted from a greater filtration pressure.

1 INTRODUÇÃO

A partir da Revolução Industrial, observou-se um crescente desenvolvimento e aumento da produção industrial, utilizando como fonte de energia o carvão das grandes reservas inglesas. A imagem de fumaça saindo das chaminés das grandes fábricas tornou-se sinônimo de desenvolvimento e prosperidade. Posteriormente, o petróleo foi o combustível que passou a mover o setor industrial. Em ambos os casos, não foi observado quase nenhuma preocupação com o impacto deste desenvolvimento sobre o meio ambiente. Como resultado, alguns episódios históricos de mortes relacionadas a doenças respiratórias foram associados a situações de poluição atmosférica intensa, ou seja, o aumento descontrolado das emissões poluentes passou a afetar o meio ambiente, agravando-se até o ponto de prejudicar a qualidade de vida da população.

Nos últimos anos, a minimização da quantidade de poluentes emitidos para o ambiente passou a ser encarada como uma questão primordial, evidenciada pela criação de diversos órgãos reguladores e agências fiscalizadoras. Em se tratando particularmente do caso de poluição atmosférica, pode-se dizer que este movimento tornou-se mais ativo a partir dos anos 60, com a assinatura dos chamados “Clean Air Acts” (Lei do Ar Limpo) em 1963, nos Estados Unidos.

Observa-se hoje que os governos estão respondendo aos problemas ambientais com legislações cada vez mais rigorosas. Este comportamento se reflete diretamente na conduta industrial, com a mudança de visão de qualidade de trabalho e qualidade ambiental por parte das empresas, havendo maiores investimentos na prevenção e minimização de emissões. Atualmente, as empresas estão revertendo estes gastos em lucros, utilizando a proteção ambiental como um instrumento de marketing, aumentando a aceitação de seus produtos pelos consumidores (com produtos ecologicamente corretos), e aumentando, logicamente, a competitividade da empresa no mercado, além de, em muitos casos, alcançarem melhores resultados com economia de material e energia.

A emissão de material particulado, juntamente com a presença de compostos quimicamente nocivos à natureza gerados por fontes antropogênicas, constitui o grande problema de poluição atmosférica atual, não apenas por afetar a qualidade de vida e a

saúde humana, mas pelos graves efeitos que estão sendo sentidos em escala global, com o comprometimento do clima terrestre e, em escalas regionais, por efeitos como chuvas ácidas, deterioração da qualidade de visibilidade, entre outros.

O material particulado pode ser definido, apesar de algumas divergências, como qualquer material líquido ou sólido que seja maior que uma molécula (THEODORE e BUONICORE, 1988). Ao conjunto de partículas sólidas ou líquidas dispersas em um meio gasoso denomina-se aerossol, que constitui assim um sistema de duas fases. Os termos fumaça, nevoeiro, névoa e poeira são utilizados para diferenciar cada tipo de aerossol, dependendo das faixas de tamanho, da forma das partículas e do comportamento das mesmas. A Tabela 1.1 sumariza alguns tipos de suspensão de material particulado, sendo que sua estabilidade depende da concentração e tamanho de partícula (HINDS, 1982).

Tabela 1.1 Tipos de suspensão de material particulado

Meio de Suspensão	Tipo de Partículas Suspensas		
	Gás	Líquido	Sólido
Gás	-	Nevoeiro, neblina, borrifo	Fumo, poeira
Líquido	Espuma	Emulsão	Suspensão, lodo
Sólido	Esponja	Gel	Liga

Fonte: HINDS, 1982

De modo geral, estas designações também podem estar relacionadas ao modo pelo qual as partículas foram formadas. As partículas de poeira são formadas em quase toda sua totalidade por processos de pulverização ou desintegração mecânica de materiais sólidos que englobam a moagem, o esmagamento e a britagem, resultando em partículas irregulares, cujas dimensões estão entre a faixa submicrômica, podendo alcançar até 200 μm (HINDS, 1982). Alguns exemplos são as cinzas, o pó de rocha e as farinhas comuns.

Na categoria fumaça encontram-se partículas formadas pela queima de material orgânico como tabaco, carvão e madeira. São partículas muito finas (entre 0,01 e 1,0 μm) de formato normalmente esférico quando líquidas ou irregulares quando sólidas. Este tipo de aerossol produz um certo grau de densidade ótica no ambiente, podendo permanecer em suspensão por longos períodos de tempo, exibindo elevado movimento Browniano.

Os fumos, por sua vez, são formados em processos de sublimação, condensação ou combustão, geralmente a altas temperaturas. As partículas deste tipo de aerossol estão entre 0,1 e 1,0 μm e sua composição geralmente é diferente da composição do material original devido à oxidação ou hidrólise (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977). Da mesma forma como a fumaça, este aerossol decanta vagarosamente e exibe forte movimento Browniano.

A névoa é formada pela condensação de água ou outro vapor, ou pela atomização de líquidos, resultando em uma suspensão de pequenas gotículas, com tamanhos entre 2 e 200 μm . HINDS (1982) considera, no entanto, que a névoa compreende partículas desde a faixa submicrômica até 20 micras, e que o termo “fog” é utilizado para caracterizar a névoa visível.

A designação “smog”, é a combinação das palavras “smoke” e “fog”, e é utilizada para denotar os produtos de reações fotoquímicas combinadas com vapor de água, constituído por partículas entre 1 e 2 μm (HINDS, 1982).

As partículas menores que 2 ou 3 μm , que compõem cerca de metade das partículas suspensas na atmosfera urbana, podem penetrar nas membranas mucosas, além de atrair e carregar compostos químicos perigosos. Dentre outros problemas, a maior área superficial das partículas pequenas de aerossóis (menores que 2,5 micra), ocasionam uma maior atividade superficial, com uma maior tendência a adsorver gases ou outras moléculas, com capacidade de facilitar as reações químicas e compostos que normalmente oxidariam a velocidades baixas, podem oxidar-se mais rapidamente. Os aerossóis têm ainda a capacidade de absorver a energia radiante e conduzi-la rapidamente aos gases em redor, que normalmente são incapazes de absorver esta energia provocando um aumento da temperatura do ar. Cabe definir neste ponto os termos aerossol monodisperso e polidisperso que denotam, respectivamente, aerossóis com partículas de igual tamanho e aerossóis constituídos por uma dada faixa granulométrica.

A remoção de partículas é um processo que pode ser realizado por diversos equipamentos, dentre os quais cita-se o filtro de manga. As formas mais primitivas da filtração datam de milhares de anos, desde quando viajantes do deserto usavam tecidos para proteger-se de tempestades de areia. Mais recentemente, médicos usavam gaze para trabalhar com doenças infecciosas e operários de metalúrgicas usavam tecidos para

filtrar poeira e fumaça, como os trabalhadores que atualmente trabalham em ambientes insalubres, usam respiradores.

Nota-se que a maioria das aplicações iniciais de filtração de gases dirigem-se à proteção individual. As primeiras aplicações industriais de tecidos para recuperação de material foram, provavelmente na indústria de fundição de não-ferrosos e de refino, para a recuperação de poeira com material valioso, empregando tecidos trançados, com centenas de metros quadrados, limpos manualmente, e localizados em uma construção à parte. O uso de mecanismos tubulares de sustentação das mangas iniciou-se pouco antes de 1900 e os primeiros mecanismos de agitação automáticos de limpeza apareceram em seguida (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

A produção comercial de filtros de manga se deu pouco antes da primeira grande guerra, por indústrias que visavam a limpeza de gases. As técnicas desenvolvidas nos anos 20 e 30 de vibração e fluxo de ar reverso são utilizadas até os dias de hoje sem muitas alterações. Na década de 40 foi desenvolvido o sistema de limpeza por jato de ar reverso. Um outro grande avanço em termos de operação de filtração ocorreu em 1957, com a utilização do pulso de ar reverso, utilizando golfadas de ar comprimido para limpar o meio filtrante (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

Os filtros de manga, apesar de serem equipamentos bastante conhecidos e utilizados há muito tempo, após terem sido desenvolvidas novas fibras sintéticas, voltaram a ser amplamente empregados na indústria, que ampliou a faixa de aplicação destes equipamentos, principalmente sob condições críticas de operação, como temperaturas mais elevadas e situações de abrasão ou corrosão. Além disso, estes equipamentos apresentam vantagens como a facilidade de construção e operação e, principalmente, a elevada eficiência, podendo ultrapassar 99,9%, para uma ampla faixa de granulometria (DONOVAN, 1985; LEITH e ALLEN, 1986), inclusive submicrômicas.

Atualmente, as pesquisas são também direcionadas ao desenvolvimento e estudo de tecidos utilizados na construção de filtros que sejam mais resistentes e adequados para situações críticas, expandindo a aplicação industrial destes equipamentos. Os avanços nos estudos dos filtros estão centrados ainda, na melhoria do seu desempenho sob o ponto de vista econômico, de forma que vários trabalhos estão

sendo realizados com o intuito de estudar meios adequados para minimizar o consumo energético e aumentar a vida útil dos filtros.

Dentro deste âmbito, o conhecimento dos fatores que interferem no desempenho dos elementos filtrantes precisam ser mais bem descritos e conhecidos.

Diante deste quadro, tornou-se evidente que o conhecimento da penetração das partículas nos tecidos e o perfil das mesmas no interior do meio filtrante após a limpeza poderiam esclarecer melhor o processo de limpeza dos filtros após cada filtração. Uma vez que se sabe que os valores de perda de carga residual interferem na frequência de limpeza e determinam, conseqüentemente, a vida útil do tecido e gasto energético, torna-se necessário uma melhor investigação do comportamento das partículas retidas no filtro após a limpeza. O trabalho de MARTINS (2001) foi desenvolvido neste sentido, tornando-se o primeiro no país a discutir este assunto, e o único encontrado na literatura consultada a estudar o fenômeno em nível microscópico.

No intuito de se ampliar a discussão realizada anteriormente, foi proposto o desenvolvimento desta pesquisa, abrangendo o estudo para vários meios filtrantes, diferentes materiais pulverulentos e condições operacionais. Desta forma, abre-se o campo de pesquisas para a investigação da influência das características do meio filtrante e dos materiais pulverulentos sobre a filtração e sobre a deposição.

Em conformidade com a problemática apresentada, este trabalho se propõe a estudar a variação da profundidade e intensidade de deposição de diferentes materiais particulados em diferentes meios filtrantes, tratados e não tratados, para vários ciclos de filtração. Além destas investigações, este trabalho busca esclarecer a relação entre a estrutura dos diversos tecidos e as características da filtração, principalmente a perda de carga durante a filtração e perda de carga residual, associando estas características com a penetração de partículas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os filtros de mangas são os equipamentos mais antigos, simples e de alta eficiência utilizados na remoção de partículas sólidas de correntes gasosas.

A operação destes sistemas consiste, basicamente, em fazer passar uma corrente gasosa contendo o material particulado através de um elemento coletor, denominado meio filtrante, onde a maior parte do material fica retido, permitindo a passagem do gás “limpo”.

Sabe-se da interação existente entre partículas e meio filtrante, o que torna essencial o conhecimento das características estruturais e da confecção dos tecidos empregados na remoção de material particulado de correntes gasosas para avaliar o desempenho do mesmo.

Assim, busca-se apresentar alguns conceitos sobre este assunto, de modo que se tenha melhores ferramentas para a discussão dos resultados.

2.1 CLASSIFICAÇÃO E FABRICAÇÃO DOS TECIDOS

Os tipos de tecidos utilizados em filtração industrial atualmente englobam uma variedade considerável de materiais, incluindo tecidos trançados e tecidos não trançados, também chamados feltros. Os materiais de fabricação incluem cerdas naturais, artificiais e sintéticas. O desenvolvimento de novas fibras promoveu o renascimento e a difusão da técnica de controle de emissão de particulados, com melhor resistência ao calor, a materiais corrosivos entre outras características, ampliando o campo de utilização dos filtros de manga.

Uma das classificações existentes para as fibras comerciais é apresentada pela ABRAFAS – Associação Brasileira dos Produtores de Fibras Artificiais e Sintéticas – ilustrada na Figura 2.1.

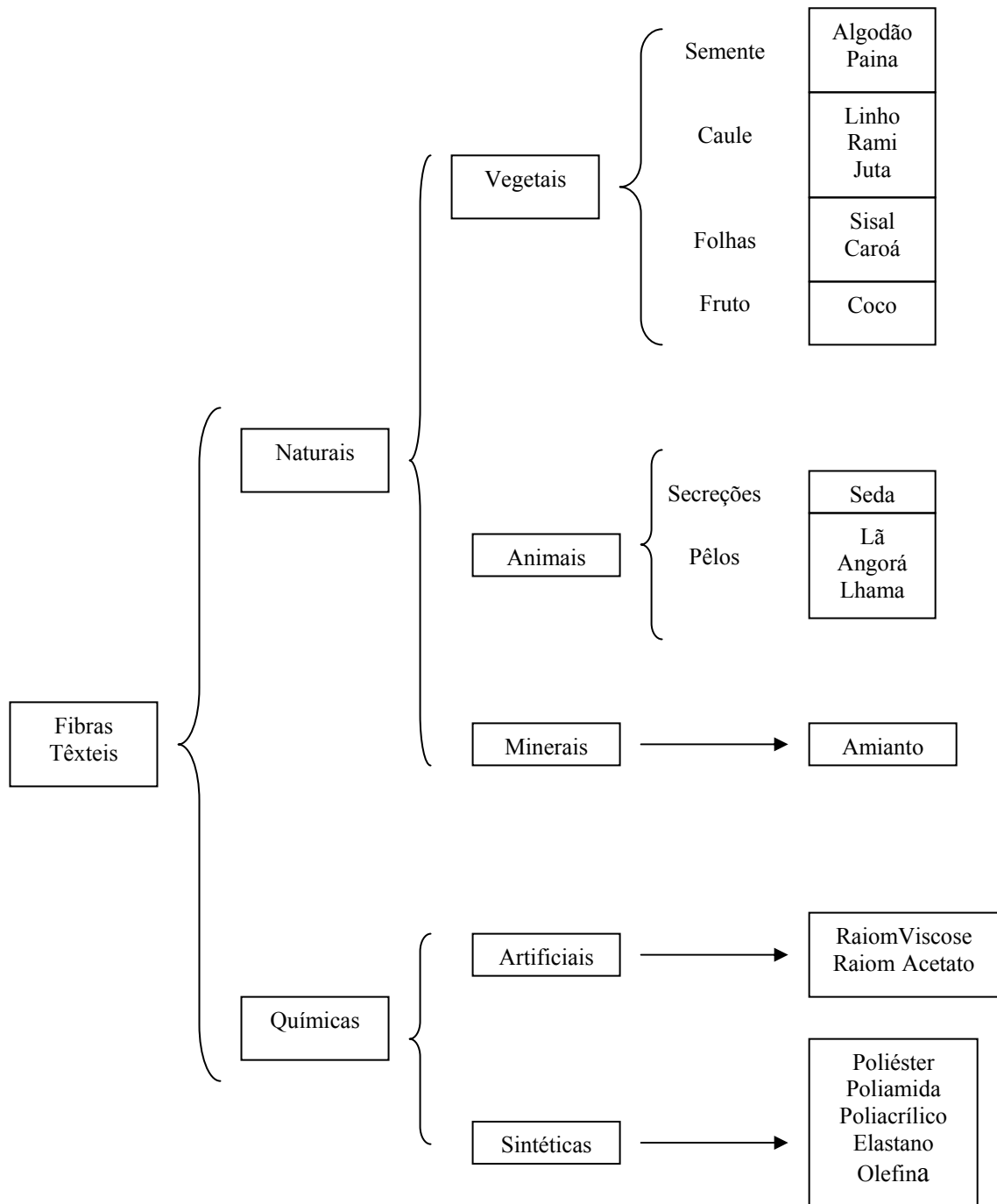


Figura 2.1: Classificação de tecidos segundo a ABRAFAS

Para uma melhor compreensão da estrutura de um tecido, cabe definir a seguir alguns outros termos e classificações relativas à sua fabricação:

Fibras: são as componentes básicas do fio. O fio pode ser confeccionado com materiais sintéticos ou naturais, e ser constituído por fibras curtas (segmentadas), que

são denominadas fibras cortadas ou “*staple*”, ou por filamentos, que é uma fibra contínua (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

Fios: a fiação transforma as fibras em fios por um processo em que as mesmas são “torcidas” em fios, sendo esta torcida medida pelo número de voltas por polegada. Quanto mais torcido o fio, mais forte este será, até certo ponto limitante (DONOVAN, 1985). De acordo com CHEREMISINOFF e YOUNG (1977), para fios formados por filamentos é considerado ótimo seis voltas por polegada e para fibras cortadas de 10 a 20 voltas. Ultrapassados estes valores, o fio perde elasticidade e torna-se quebradiço.

As propriedades de resistência lateral e longitudinal dos tecidos podem ser atribuídas, pelo menos em parte, às combinações de torcidas à esquerda ou à direita, denominadas torcidas “S” e “Z”, respectivamente, como ilustra a Figura 2.2.

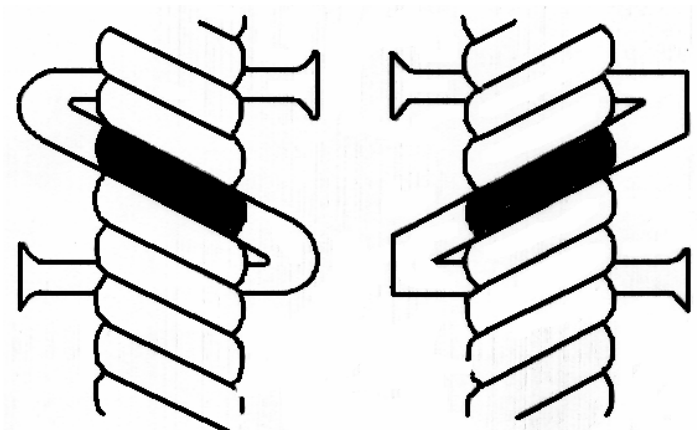


Figura 2.2: Tipos de torcida utilizados na confecção de fios.

Fonte: BILLINGS e WILDER (1970)

Padronização: Apesar da existência de vários parâmetros de caracterização dos tecidos, a indústria têxtil padronizou sistemas mais convenientes, como o Tex e o Denier. O número Tex é definido pela massa em gramas de um quilômetro de fio e multiplicando este valor por 9 obtém-se o número em Denier (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

Tecidos Trançados: Conforme a ABNT/TB-392, um tecido trançado é uma estrutura produzida pelo entrelaçamento de um conjunto de fios de trama formando um ângulo de (ou próximo a) 90°. O conjunto de fios que correm ao comprimento (longitudinalmente) de um pano é chamado de urdume e forma a estrutura básica do

tecido trançado, que deverá suportar o tecimento. O fio que é entrelaçado com o urdume e é perpendicular a este, é designado trama, formando-se assim o tecido trançado.

Os tecidos podem ser trançados de várias formas. O trançado plano é a forma mais simples, com cada fio da trama passando acima e abaixo do urdume.

O trançado sarja é um segundo tipo de tecido, formado pelo entrelaçamento de mais de um e menos de quatro fios longitudinais em seqüência do fio transversal. Ao fim de cada linha sucessiva, o padrão é mudado em um passo para a direita ou à esquerda. Este tipo de trançado fornece um tecido mais resiliente e mais flexível que o trançado plano.

O terceiro tipo de trançado é o cetim (*satim*), onde mais de quatro fios longitudinais são entrelaçados por vez. Este tipo de trançado promove um acabamento acetinado ao tecido, mas não confere boa resistência como os outros trançados. Tais tecidos podem aparecer em duas variedades, sendo uma a face de fios longitudinais e a outra a de fios transversais, dependendo de qual fio aparece na superfície. Estes tipos de entrelaçamento podem ser visualizados na Figura 2.3.

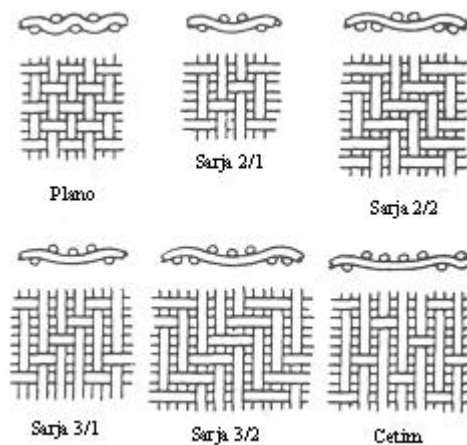


Figura 2.3: Tipos de tecidos trançados.
Fonte: BUONICORE e DAVIS, 1992

Os tecidos trançados são geralmente utilizados em sistemas de filtração onde o fluxo do gás é direcionado do interior dos sacos para fora, que operam com baixas vazões de ar e que utilizam limpeza por fluxo de ar reverso ou por vibração mecânica (DAVIS, 1992). SANCHEZ et al. (1997) comentaram que em sistemas de limpeza baseados na agitação, empregam-se também tecidos trançados, normalmente de fibras

naturais, tais como algodão e pêlos, mas também de fibras químicas, que são mais resistentes ao estiramento e flexão, provocados pela limpeza.

Não tecidos ou feltros: conforme a NBR 13370, um não tecido é formado por uma estrutura plana, flexível e porosa, constituído de um véu ou manta de fios ou filamentos orientados direcionalmente ou ao acaso e consolidados por vias mecânicas, químicas ou térmicas ou pela combinação destas. Normalmente, um tecido apropriadamente trançado é a base da confecção do feltro, que confere resistência e estabilidade dimensional ao tecido, enquanto que o feltro em si, formado pelas fibras desarranjadas, é responsável pela captura das partículas.

A fabricação dos feltros se inicia pela formação de uma manta, constituída por uma ou mais camadas de véus. Estes véus são obtidos por processos de cardagem, por fluxo de ar, por deposição eletrostática, por suspensão em meio líquido ou por fiação direta de filamentos contínuos. Em seguida, a manta é consolidada por processos químicos, utilizando resina, secagem e polimerização; por meios mecânicos, usando agulhas que entrelaçam as fibras/filamentos, costuras ou jatos de água; ou físicos, utilizando calor e pressão. Pelo próprio processo de produção, os feltros exibem muito mais poros por unidade de área que os tecidos trançados (HARDMAN, 2001). DONOVAN (1985) afirmou que em tecidos não-trançados a formação da torta ocorre mais lentamente que em tecidos trançados. Isto porque o espaço disponível para passagem do fluxo em um tecido trançado é mais concentrado que em um não-trançado, e o bloqueio desta passagem ocorre mais rapidamente por causa deste fluxo concentrado.

A fabricação dos feltros poliméricos pode ser classificada em três categorias básicas, conforme o processo de manufatura da rede inicial (véu) que constitui o tecido (DONOVAN, 1985):

- a. Processo a seco: a rede é formada por um processo de cardagem, que separa, alinha e libera as fibras como uma rede para a posterior etapa de ligação.
- b. Processo a úmido: semelhante ao processo de fabricação de papel, onde as fibras são dispersas em meio líquido, e alimentadas em uma esteira aquecida que seca as fibras.
- c. Processo de ligação dos fios: é um processo que, diferente dos outros dois, envolve desde a produção do polímero até a finalização do tecido em si. O produto de

entrada não são as fibras, mas sim o predecessor, o polímero fundido. Este é extrudado e em seguida, as fibras assim formadas são orientadas durante a queda em uma esteira. A seguir, a rede formada passa pela etapa de ligação, que pode ser térmica, química, ou por pressão.

A técnica da agulhagem é um método mecânico de ligação da rede formada, que consiste em combinar duas ou mais camadas de tecidos produzidos pelas técnicas apresentadas nos itens (a) e (b), ou naturais, e atravessá-las com agulhas farpadas. Este processo visa distribuir as fibras uniformemente pela matriz trançada (CLARK, 2001). Variando-se a distância entre as agulhas modifica-se as características dos tecidos. Uma alternativa mais recente ao processo de agulhagem é a substituição das agulhas por jatos de água de alta pressão.

Os fios formados por fibras sintéticas, para fabricação de tecidos trançados, podem se apresentar em três configurações. O monofilamento é formado pela extrusão de um filamento de fibra contínua, após a solidificação.

O fio multifilamentoso é formado quando várias fibras são torcidas juntas, assim que se solidificam, e apresenta maior flexibilidade quando comparado ao monofilamento, maior espessura e pode ser trançado em estruturas mais justas.

Os fios estirados (“spun”) são formado por fibras sintéticas cortadas em partes curtas (40-70 mm) e processadas (ou cardadas) como as fibras cortadas naturais (DONOVAN, 1985). Os tecidos trançados desta formas são mais volumosos, mais rígidos, e tem maior capacidade de coleta. As desvantagens englobam a baixa resistência ao estiramento e dificuldades na limpeza da torta. Uma representação destes tipos de fios pode ser conferida pela Figura 2.4.

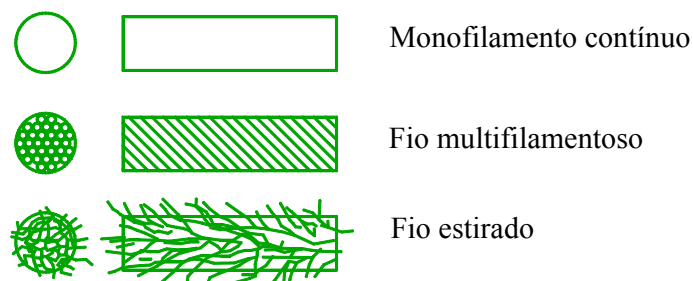


Figura 2.4: Tipos de confecção de fios sintéticos.

Fonte: DONOVAN, 1985

Alguns exemplos de tecidos assim constituídos pode ser observado pela Figura 2.5.

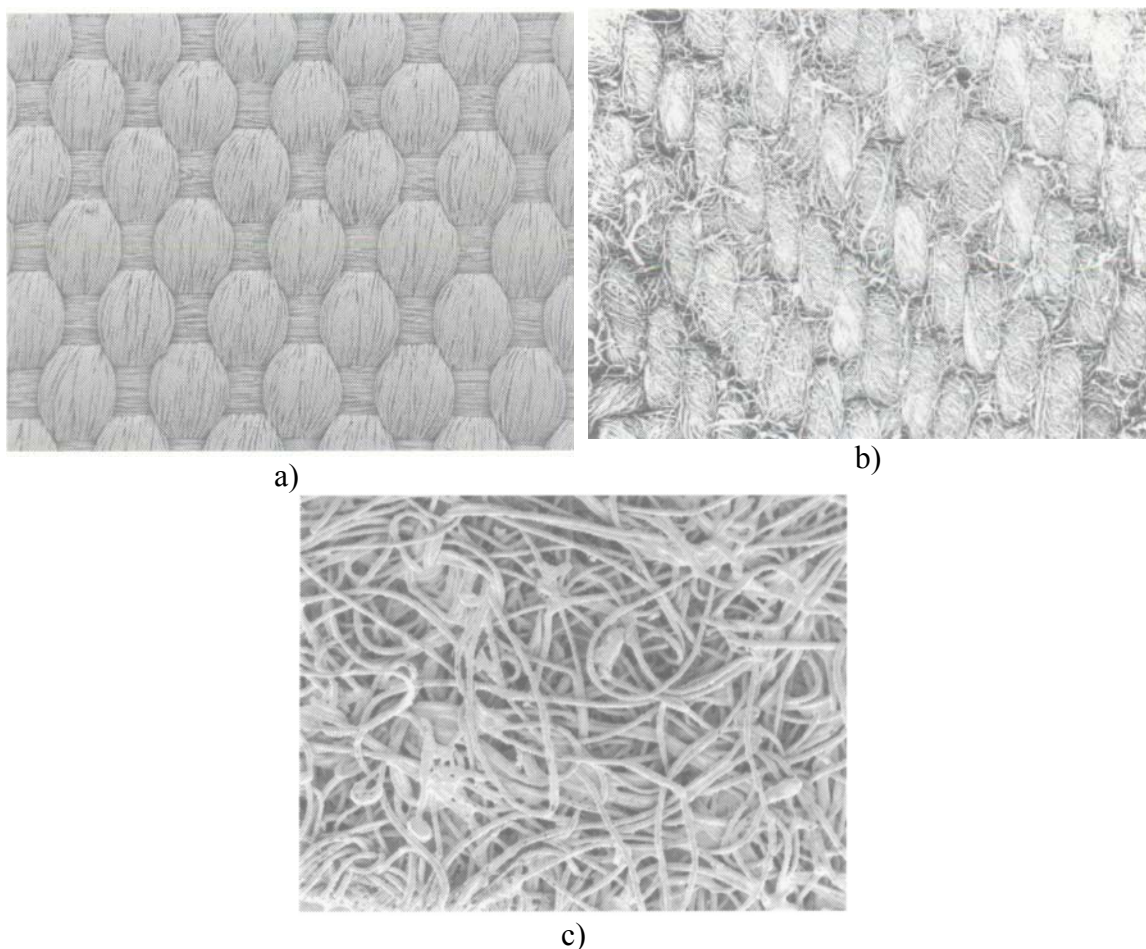


Figura 2.5: Tipos de tramas: a) trama plana com fios multifilamentosos; b) trama sarja 2/1, com fios estirados e fibras cortadas (staple spun); c) feltro agulhado.

Tanto os tecidos trançados quanto os feltros possuem uma eficiência inicial relativamente baixa, mas que aumenta com a formação da torta (HINDS, 1982).

THEODORE e BUONICORE (1988) afirmam que os feltros limpos são mais eficientes que tecidos trançados limpos, mas que estes últimos são capazes de alcançar eficiências comparáveis após uma camada de partículas ter se acumulado em sua superfície. Na indústria, este processo de formação da torta pode durar, dependendo da carga e da natureza das partículas, desde algumas horas até alguns dias. Por este motivo, no caso dos tecidos trançados, deve-se cuidar para que a limpeza não elimine completamente a camada superficial da torta, o que diminuiria a eficiência da filtração. Como afirmam os autores, este problema é mais difícil de ocorrer nos feltros pela grande quantidade de partículas retidas no interior do tecido após a limpeza. Assim, os feltros necessitariam de técnicas de limpeza mais rigorosas, empregando-se frequentemente os métodos de pulso de ar. Os referidos autores notificam ainda que

tecidos trançados utilizados na remoção de partículas muito pequenas e a baixas cargas são normalmente revestidos com asbestos ou materiais semelhantes, com o objetivo de formar uma camada artificial que simularia uma torta de filtração, aumentando a eficiência inicial e evitando a penetração das partículas no tecido.

2.1.1 MÉTODOS DE TRATAMENTO DE TECIDOS OU FINALIZAÇÃO

Existem várias formas de tratamento, entre mecânicos, térmicos e químicos, para melhorar o desempenho dos filtros de tecido (DONOVAN, 1985).

Dentre os motivos que estimulam a realização de tratamentos finalizadores estão: (i) assegurar a estabilidade adequada ao tecido (contra o encolhimento, por exemplo), (ii) modificar as características superficiais, alterando inclusive a capacidade de liberação da torta, (iii) regular a permeabilidade do tecido e conseqüentemente a capacidade de coleta (HARDMAN, 2001) e (iv), minimizar a penetração de partículas e diminuição da colmatação do tecido (MAUSCHITZ et al., 2005). Dentre os processos finalizadores pode-se citar:

Calandragem: processo utilizado para tecidos não trançados, onde o tecido passa através de rolos que o comprimem uma ou mais vezes, agindo como um compactador. Na calandragem a quente, a temperatura é uma variável do processo. (DONOVAN, 1985).

Envernizamento ou envidramento: processo onde se tem uma calandragem a quente bem controlada, onde ocorre a fusão das fibras da superfície, conferindo aspecto vitrificado (DONOVAN, 1985).

Escovação: nesta operação, uma vigorosa escovação da superfície resulta no levantamento dos fios do tecido. Esta técnica é aplicada em filtros trançados, onde a eficiência inicial de coleta é baixa (ROTHWELL, 1989).

Chamuscagem: este processo utiliza uma chama para eliminar fibras preponderantes da superfície, como se fosse um processo inverso à escovação. Este processo evita que as fibras da superfície sejam incorporadas à torta e formem uma espécie de “armadilha”, dificultando a limpeza.

Impregnação química: consiste na imersão do tecido em banho químico. Este processo é utilizado para melhorar o desempenho do filtro, reduzindo o ataque químico, aumentando a resistência a ácidos, facilitando a liberação da torta e retardando a propagação de chama (CLARK, 2001).

Alguns tecidos podem conter, pespontados à costura, fios de metais como cobre ou aço inoxidável, para descarga da carga das partículas e evitar faíscas de eletricidade estática (CHEREMISINOFF e YOUNG, 1977).

Além disso, alguns meio filtrantes podem receber tratamento antiestático, tratamento de orientação de fibras, recobrimento com membranas, receber resinagem com PTFE, ou ainda, ser plastificado em um ou ambos os lados, além de muitos outros tipos de tratamento disponíveis (LORA, 2002). A Tabela 2.1 apresenta alguns tipos de tecidos comumente utilizados na remoção de partículas.

Diferentemente do mecanismo de ação de uma peneira, em que apenas as partículas com diâmetros superiores à abertura da malha ficam retidas (HINDS, 1999), os filtros de tecido possuem elevada eficiência de coleta para uma ampla distribuição granulométrica. Apesar da abertura dos poros dos tecidos comerciais utilizados como meio filtrante serem de aproximadamente 100 μm , estes removem adequadamente partículas menores que 0,5 μm e coletam uma quantidade substancial de partículas menores que 0,01 μm (THEODORE e BUONICORE, 1988).

Segundo ROSS (1972), a captura de partículas de diâmetros inferiores às aberturas dos poros dos tecidos se deve, a mecanismos como: a impactação de partículas grandes com as fibras; a difusão de partículas submicrômicas pelas fibras; a atração e repulsão eletrostática e a retenção das partículas grossas pelo tecido e das finas pela torta formada, este último sendo o mecanismo que se assemelha ao peneiramento. Os principais mecanismos serão estudados mais criteriosamente no item 2.1.2.

Tabela 2.1: Tecidos utilizados como meios filtrantes e suas propriedades.

Nome genérico	Fibra	Resistência à tensão	Resistência à abrasão	Densidade específica	Umidade normal (%)	Temperatura operacional (°C)	Ácido	Base	Solventes orgânicos
Fibra natural de celulose	Algodão	Forte	Média	1,6	7	82	Baixa	Média	Boa
Comentário: disponível a baixo custo									
Fibra natural animal	Lã (pêlo)	Média	Média	1,3	15	99	Razoável	Baixa	Boa
Comentário: desgaste com o tempo (idade), suscetível à ação de microrganismos									
Poliiolefina	Polipropileno	Excelente	Boa	0,9 - 0,91	-	88	Excelente	Excelente	Boa, exceto cetonas, ésteres aromáticos e hidrocarbonetos alifáticos
Comentário: é a fibra sintética mais barata, muito forte, baixa absorção de umidade e excelente resistência química									
Papel	Papel	Fraca	-	1,5	10	82	Baixa	Média	Boa
Comentário: baixo custo									
Poliamida	Nylon®	Excelente	Excelente	1,1	5,0	104	Média	Boa	Boa (exceto fenol e ácido fórmico)
Poliéster	Dacron®	Excelente	Excelente	1,4	0,4	138	Boa	Média	Boa (exceto fenol)
Comentário: a boa qualidade global e custo relativamente baixo transformaram-no no padrão de vários coletores. Excelente resistência ao calor, suscetível à hidrólise por calor seco.									
Acrilonitrila (acrílico)	Orlon®	Média	Média	1,3	1,0	121	Boa	Média	Boa
Comentário: aplicações comuns incluem filtração de metais ferrosos e não-ferrosos, cimento, cal, fertilizantes, produtos alimentícios, areia e carvão									
Poliamida aromática (nylon)	Nomex®	Muito boa	Muito boa	1,4	5,0	232	Boa	Média	Boa (exceto fenol e ácido fórmico)
Comentário: é a fibra sintética mais resistente à abrasão. Limpeza fácil									
Fluorocarbono	Teflon®	Média	Baixa	-	-	232	Excelente	Excelente	Excelente
Comentário: pode ser utilizado a altas temperaturas e possui excelente resistência química									
Vidro	Vidro	Excelente	Baixa	2,5	0,0	288	Média	Média	Boa
Comentário: todas as propriedades são dependentes do tratamento do tecido; por sua baixa resistência à abrasão raramente é usado em coletores de pulso ou fluxo reverso									
Asbestos	Asbestos	Fraca	-	3,0	5,0	260	Média	Média	Boa
Polietileno	Polietileno	Forte	-	1,0	0,0	121	Média	Média	Média

2.1.2 CAPTURA DE PARTÍCULAS

Tanto em filtros de manga quanto em outros filtros e equipamentos utilizados na remoção de particulados, as partículas são coletadas através de quatro mecanismos principais: interceptação direta, inércia, difusão e gravidade. Devido à complexidade destes fenômenos, geralmente realizam-se estudos de modo simplificado, considerando-se a coleta de partículas em uma única fibra, perpendicular ao sentido de escoamento do fluido (HINDS, 1999). Esses mecanismos são particularmente importantes para os primeiros estágios da filtração e serão descritos a seguir (MATESON e ORR, 1987).

Interceptação Direta: é um mecanismo que depende do tamanho da partícula, sendo esta coletada quando se aproxima da fibra a uma distância igual a seu raio, sendo especialmente importante quando se trabalha com partículas maiores que 1 μm . A Figura 2.6 ilustra este mecanismo.

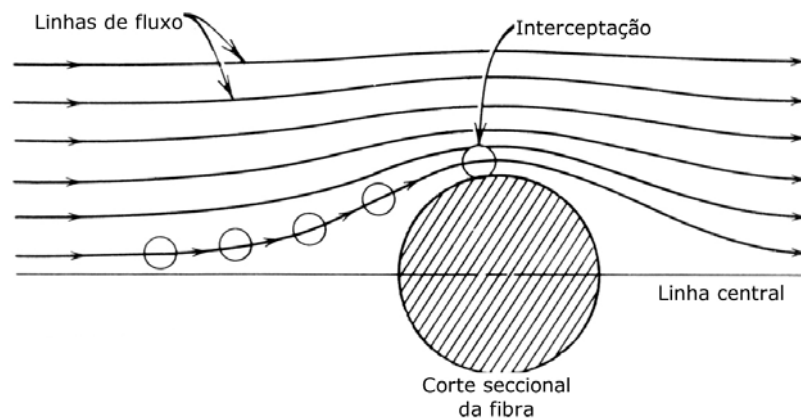


Figura 2.6: Desenho esquemático da captura por interceptação direta

Nos cálculos relacionados a este tipo de mecanismo, a partícula é considerada sem massa, mas com tamanho finito. Como não possui massa, não existem efeitos inerciais, de modo que a partícula acompanha sua linha de corrente, sem se deslocar dela quando se aproxima da fibra (DULIEN, 1989). RUBOW e LIU (1986) forneceram um parâmetro adimensional (R), que caracteriza a captura por interceptação, dado pela Equação (2.1):

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (2.1)$$

sendo d_p o diâmetro das partículas e d_f o diâmetro das fibras. Conforme DONOVAN (1985), a captura via interceptação direta é desprezível quando $R \leq 0,1$. Deste modo, torna-se evidente que a deposição das partículas por interceptação é promovida pelo aumento do diâmetro de partículas.

Impactação ou deposição inercial: neste caso, admite-se que as partículas possuem massa finita. A presença de um corpo no caminho do escoamento produz uma curvatura nas linhas de corrente, seja ele uma fibra ou uma esfera. As partículas são projetadas de suas linhas de corrente originais por ação inercial - uma vez que o sentido do movimento torna-se tangencial às linhas de corrente - e se chocam com o corpo coletor, podendo ou não se depositar em sua superfície. Neste mecanismo é evidente a influência da velocidade e da massa das partículas (DULIEN, 1989) na eficiência de coleta, uma vez que de ambas depende a força inercial. Este mecanismo é governado pelo número de Stokes, dado pela Equação 2.2:

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

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 é a viscosidade. A eficiência de captura de uma fibra aumenta com o aumento do número de Stokes, por causa da maior inércia (maiores d_p ou ρ_p), maior velocidade da partícula, ou curvaturas mais bruscas das linhas de corrente resultantes de menores diâmetros de fibra (HINDS, 1999). Segundo GUTFINGER e TARDOS (1979), citado por LEE (1986), a contribuição da impactação inercial é insignificante para números de Stokes inferiores a 0,1. A Figura 2.7 ilustra o mecanismo de impactação inercial.

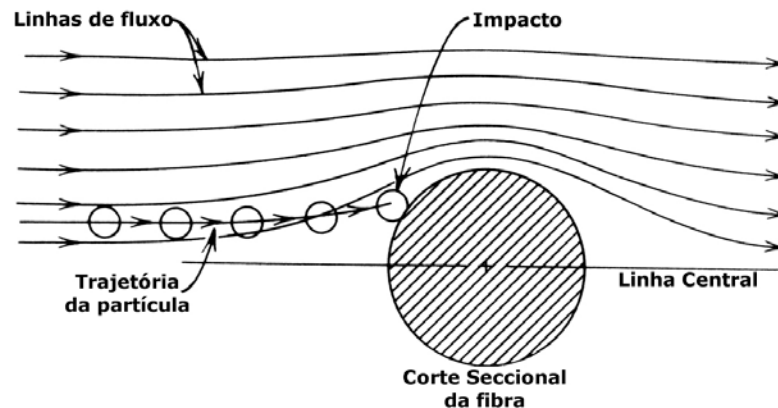


Figura 2.7: Desenho esquemático da captura por impactação inercial.

Difusão ou movimento Browniano: normalmente as linhas de corrente não coincidem com a trajetória das partículas pequenas por influência do movimento Browniano. Este efeito é especialmente importante para partículas menores que $1\mu\text{m}$, sendo que a partir deste diâmetro, as forças inerciais tornam-se cada vez menos ativas e para partículas de $0,1\mu\text{m}$ 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 2.3 (RUBOW e LIU, 1986):

$$Pe = \frac{V_p \cdot d_f}{D} \quad (2.3)$$

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 ($V_p = V_f / \varepsilon$). Assim, a intensidade da deposição aumenta com o decréscimo do número de Peclet e do diâmetro de partículas (HINDS, 1999). A Figura 2.8 apresenta um esquema da captura por difusão browniana.

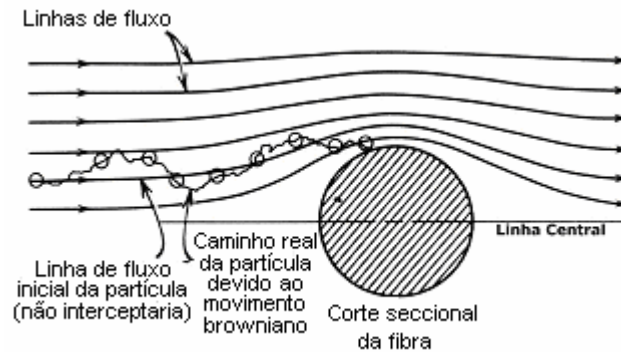


Figura 2.8: Desenho esquemático da captura por difusão.

Gravidade ou sedimentação: este mecanismo predomina em situações onde se têm partículas grandes e com baixa velocidade, não consistindo exatamente em um mecanismo de captura de aerossóis. Neste caso, as partículas desviam sua trajetória das linhas de corrente, podendo assim, tocar a superfície das fibras e serem capturadas. A Figura 2.9 esquematiza a captura por gravidade.

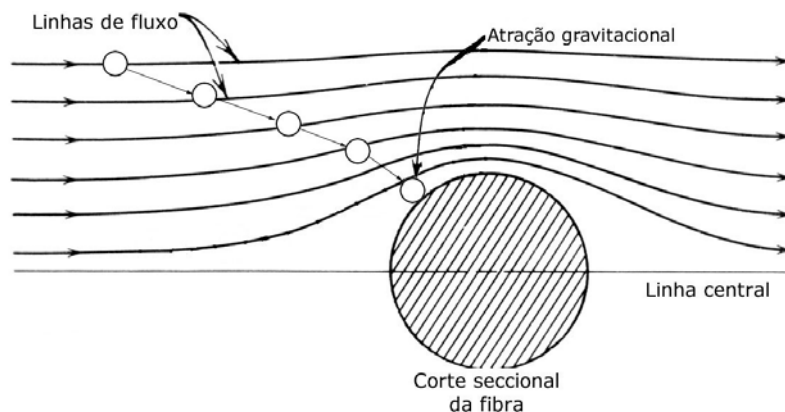


Figura 2.9: Desenho esquemático da captura por ação gravitacional.

Por estas informações, tem-se que, aumentando-se o diâmetro de partículas, os mecanismos de interceptação, impactação e gravidade tendem a prevalecer, enquanto que a diminuição delas incentiva a coleta pela difusão Browniana. Inevitavelmente, haverá regiões com predomínio de mais de um mecanismo de captura. Conforme LEE (1986), nestas regiões ocorre maior penetração de partículas através do meio filtrante, ou seja, regiões de eficiência mínima. A Figura 2.10 ilustra a eficiência pertinente a cada mecanismo e a eficiência total, para um filtro de espessura igual a 1 mm,

densidade de empacotamento (α) igual a 0,05, diâmetro de fibras igual a 2,0 μm e velocidade de 0,1m/s, conforme a teoria de captura por uma fibra simples.

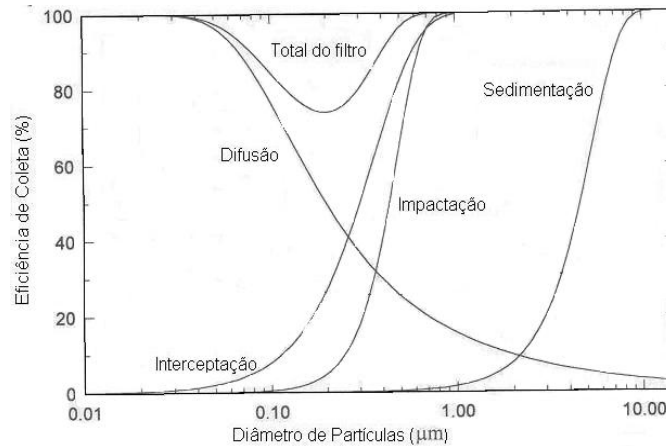


Figura 2.10: Interação dos mecanismos de coleta e eficiência resultante dos mesmos.
Fonte: HINDS, 1999.

A partir desta constatação, FUCHS (1964) mostrou que a eficiência total não é dada pela soma das eficiências pertinentes a cada mecanismo, mas é menor que ela. Isto porque vários mecanismos acabam competindo pela mesma partícula, e sua captura pode ser contabilizada mais de uma vez (HINDS, 1999).

2.2 OPERAÇÃO DA FILTRAÇÃO

O processo de filtração se desenvolve, a partir de um tecido limpo (ou virgem), em uma seqüência de etapas. O comportamento e duração de cada fase são determinados por uma série de fatores que serão discutidos neste tópico.

Em linhas gerais admite-se que, para os tecidos utilizados em filtros de manga, a filtração se dá primeiramente pela captura de partículas no interior do meio filtrante, na superfície das fibras. A esta etapa segue-se a impregnação do tecido e a formação de uma camada superficial de material particulado, denominada torta de filtração (POWELL et al., 1998).

Na primeira etapa da filtração, denominada também de filtração interna, as fibras do MEIO filtrante são responsáveis pela captura das partículas. Estas ficam

retidas nas fibras por ação dos mecanismos descritos anteriormente (THEODORE e BUONICORE, 1988). Nesta fase, a penetração de partículas através do tecido é maior, e tende a diminuir com o tempo de filtração (GRAEF et al., 1995), o que implica em uma menor eficiência de captura apresentada pelo tecido neste período, mas que aumenta rapidamente com o decorrer do processo. No entanto, a perda de carga nesta fase aumenta lentamente (THOMAS et al., 2001; WALSH et al., 1996), e esta resposta é diretamente proporcional ao número de partículas coletadas, ou seja, a perda de carga apresenta um comportamento linear em função da massa coletada e dependente dos mecanismos de captura (JAPUNTICH et al., 1994).

A duração desta fase inicial de filtração, caracterizada pelo lento acréscimo da perda de carga, pode ter maior ou menor duração, dependendo das características (eficiência) do tecido (WALSH, 1996; CALLÉ et al., 2002b). No caso de filtros HEPA (sigla em inglês para filtros de ar de alta eficiência – High Efficiency Particulate Aerosol), esta etapa praticamente inexistente, sendo a formação da torta quase instantânea (JAPUNTICH et al., 1994).

Para os demais tipos de filtros industriais, a duração desta fase é mais pronunciada no primeiro ciclo, com um tecido virgem, e tem sua duração sensivelmente diminuída nos ciclos subsequentes (ROTHWELL, 1980), mas mesmo no primeiro ciclo sua duração é muito breve (PAYATAKES, 1977)

Com o transcorrer da filtração e conseqüente aumento das partículas coletadas, inicia-se uma fase de transição, com a formação de dendritos (WALSH et al., 1996). Estes dendritos são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio, que passam a agir como novos elementos coletores (REMBOR e KASPER, 1996) e estão apresentados na Figura 2.11. A Figura apresenta a variação da forma dos dendritos com os valores das constantes que definem os mecanismos de captura, descritas anteriormente: R, Peclet e Stokes.

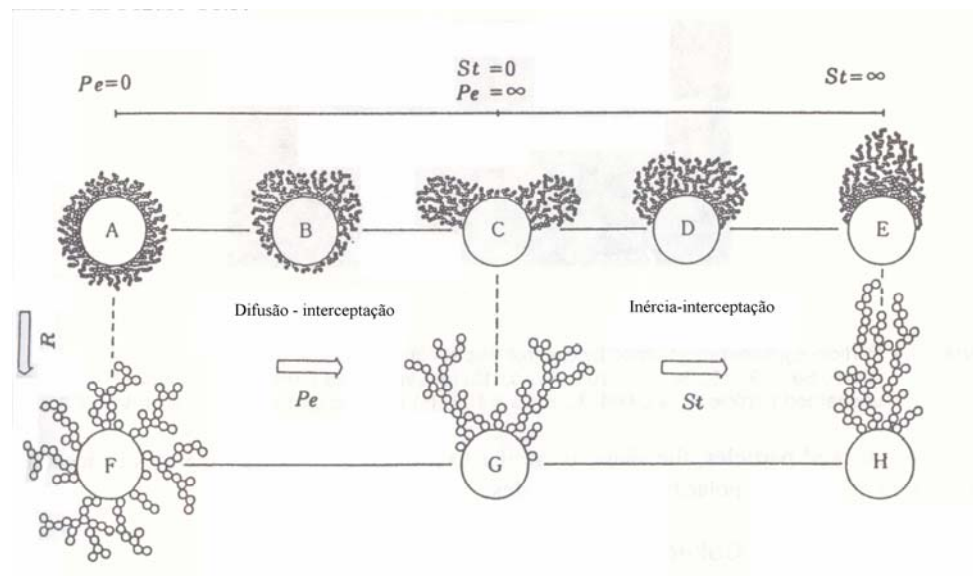


Figura 2.11: Ilustração da formação de dendritos no interior dos meios filtrantes e sua variação conforme o mecanismo de coleta predominante.

Hoje sabe-se que quanto menor a velocidade de filtração, maior a porosidade destas estruturas dendríticas (KANAOKA e HIRAGI, 1990), e quanto menor as partículas, mais rápido se dá o desenvolvimento destes dendritos (WALSH e STENHOUSE, 1997).

PAYATAKES (1977) subdivide esta fase intermediária em duas, sendo que inicialmente ocorre a deposição de partículas sobre partículas, e segue-se a fase em que estes dendritos crescem e interagem com seus vizinhos, formando uma cobertura de espessura não uniforme ao redor de cada fibra, formando o que o autor denomina de matriz porosa interna.

Como resultado da formação destas estruturas, tem-se um acréscimo na taxa de aumento da perda de pressão e significativa diminuição da penetração das partículas através do filtro (WALSH, 1996; BROWN e WAKE, 1999). Os dendritos formados vêm a constituir, finalmente, uma camada superficial de material particulado, denominada torta de filtração.

A partir da existência da torta na superfície do tecido, tem-se a terceira fase da filtração, em que a perda de carga alcança a sua máxima taxa de aumento e a penetração através do tecido e a eficiência tornam-se constantes (WALSH, 1996; BROWN e WAKE, 1999; THOMAS et al., 2001).

Nesta terceira fase, conhecida como filtração superficial, o meio filtrante passa a atuar apenas como suporte para a torta, sendo esta capaz de remover partículas mais finas da corrente gasosa por peneiramento, ou por outros mecanismos de captura já descritos anteriormente. Desta forma, é interessante que se estabeleça a filtração superficial o quanto antes, para que o sistema alcance maior eficiência de remoção (ROTHWELL, 1980).

2.2.1 A FORMAÇÃO DA TORTA

A previsão do momento exato de formação de torta é difícil de se obter fisicamente, mesmo porque os tecidos não são materiais uniformes. Vários autores admitem um valor experimental para demarcar o ponto em que a torta se forma, designado por ponto de colmatação.

Este ponto pode ser entendido também como sendo a capacidade de retenção do meio (JAPUNTICH et al., 1994).

Segundo WALSH (1996), o ponto de colmatação é dado pelo lugar geométrico obtido pelo gráfico de perda de carga em função da carga mássica, correspondente ao cruzamento da assíntota da curva com o eixo das abscissas, como apresentado pela Figura 2.12. Assim se obtém a massa de material particulado necessária para formar a torta (WALSH e STENHOUSE, 1997).

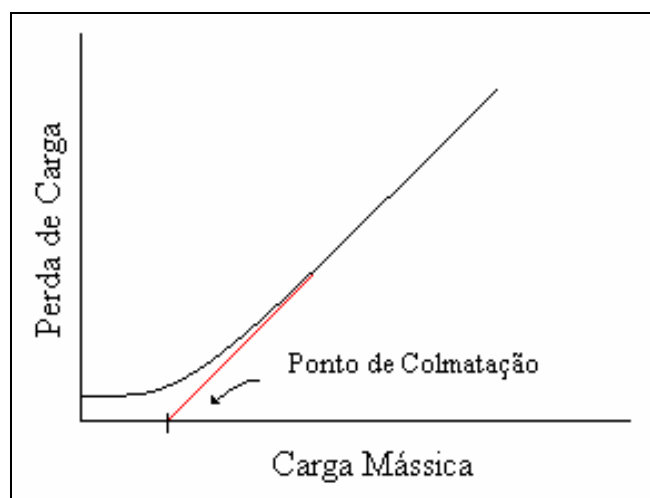


Figura 2.12: Determinação do ponto de colmatação do meio, conforme WALSH (1996).

A colmatação é tanto mais rápida quanto menores as partículas envolvidas (WALSH e STENHOUSE, 1997; WALSH et al., 1996), e quanto mais densamente empacotados forem os filtros utilizados (GRAEF et al., 1995; WALSH, 1996), uma vez que há um menor espaço disponível entre as fibras para a deposição das partículas.

KANAOKA e HIRAGI (1990) verificaram um crescimento mais acelerado dos dendritos que antecedem a formação da torta nos casos em que prevalece a captura de partículas pelo mecanismo de difusão, sendo este crescimento mais moderado na faixa de coleta da interceptação direta e mais lento quando a coleta se dava no regime inercial. Estas informações foram ratificadas no trabalho de JAPUNTICH et al. (1997) que comentaram que, no caso dos filtros de papel, este ponto é função do mecanismo de coleta que rege o processo e sugeriram que, para um dado mecanismo, este ponto é proporcional ao diâmetro do poro.

O aumento da espessura da torta resulta em um aumento da perda de carga no sistema, tornando necessária a limpeza periódica do filtro para remover a mesma e manter a perda de carga em níveis adequados de operação.

2.2.2 MECANISMOS DE LIMPEZA

No momento em que a perda de carga atinge um valor pré-estabelecido, ou um tempo de filtração fixado, a remoção da camada de partículas formada torna-se imprescindível do ponto de vista econômico e operacional. Os métodos apresentados pela literatura para a remoção do material coletado incluem a vibração das mangas, a reversão do ar, por meio um fluxo contínuo reverso ou por um pulso de ar a alta pressão, ou ainda a combinação destes.

Segundo LORA, a (2002) a limpeza por agitação (ou vibração) tem como vantagem a sua maior intensidade, o que permite operar com uma relação gás/pano maior que em sistemas de fluxo reverso de gás, com um menor consumo de energia.

A limpeza por fluxo de ar reverso é realizada com o auxílio de um ventilador que produz um fluxo de ar no sentido inverso ao da filtração, que fratura e depois descola a torta. Neste caso, a coleta da partícula é realizada no interior das mangas. Este procedimento é desenvolvido com baixas velocidades de modo a não sobretensionar os

filtros, é de simples operação, além de permitir um fácil isolamento dos compartimentos.

Os métodos que utilizam pulsos de ar reverso empregam um jato de ar com alta velocidade e pequeno volume, que passa pelo interior das mangas causando a expansão repentina das mesmas, deslocando a poeira coletada na superfície externa (THEODORE e BUONICORE, 1988). Esta técnica permite que a relação gás /pano seja mantida na faixa de 4 a 8 m³/m².min, tornando os sistemas mais compactos, e as mangas podem ser limpas sem interrupção do processo, com maior eficiência de remoção, resultando em um menor consumo de ar comprimido (LORA, 2002). Em contrapartida, a vigorosa limpeza pode danificar o tecido, caso o mesmo não seja apropriado (BUONICORE e DAVIS, 1992).

Na prática, após a limpeza, verifica-se a permanência de uma fina camada de torta sobre o meio filtrante (KOCH et al, 1996). Com o aumento do número de ciclos (definidos como o período de uma filtração e uma limpeza), nota-se que a penetração de sólidos no tecido é cada vez menor, a resistência efetiva do meio é cada vez maior e o tempo de filtração cada vez menor (ROTHWELL, 1980). A Tabela 2.2 apresenta os métodos mais utilizados na limpeza de filtros de manga.

Tabela 2.2: Comparação entre alguns métodos de limpeza

Método de limpeza	Uniformidade da limpeza	Tipo de tecido	Velocidade de filtração	Custo do equipamento	Custo de energia	Carga de poeira
Fluxo reverso, sem flexibilidade	Boa	Trançado	Média	Médio	Médio – baixo	Média
Fluxo reverso com colapso	Média	Trançado	Média	Médio	Médio – baixo	Média
Pulso reverso	Muito Boa	Trançado feltro	Muito Alta	Alto	Alto	Alta
Vibração	Boa	Trançado	Média	Médio	Médio – baixo	Média
Sônica	Média	Trançado	Média	Médio	Médio	-
Manual	Boa	Trançado feltro	Média	Baixo	-	Baixa

Fonte: THEODORE e BUONICORE (1988)

A Figura 2.13 ilustra alguns métodos citados na Tabela 2.2.

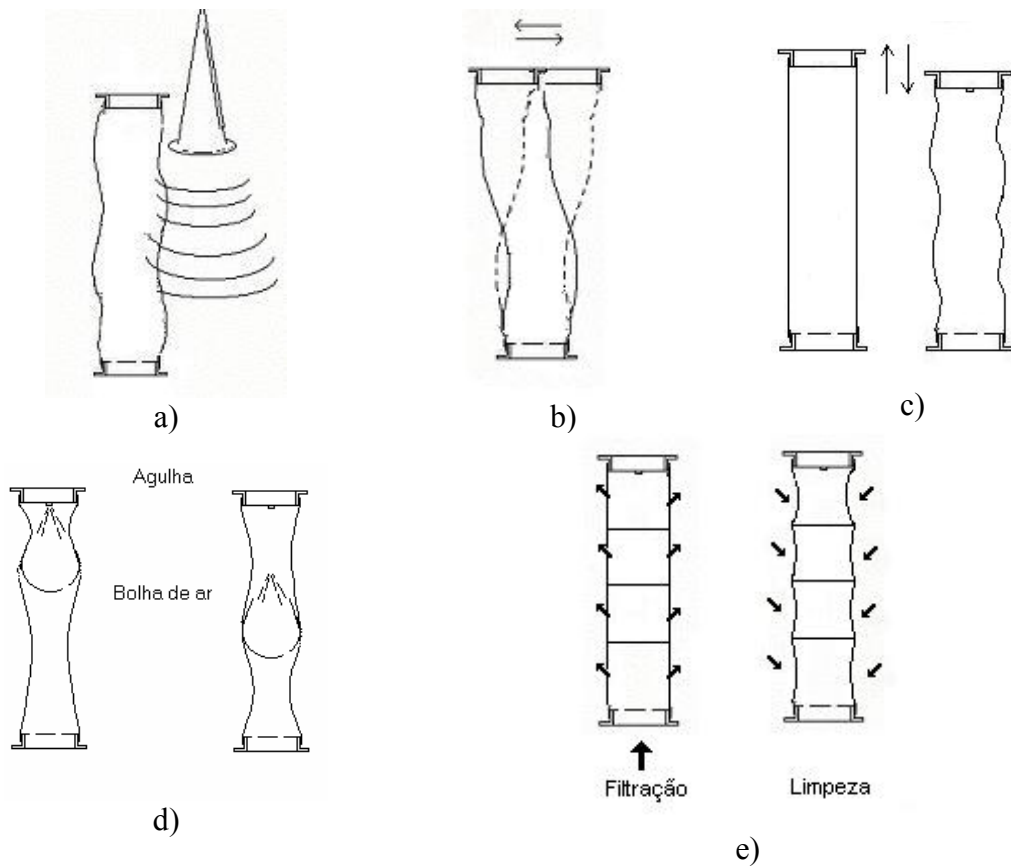


Figura 2.13 Métodos de limpeza de filtros de tecido. a) sônica; b) oscilação; c) vibração; d) pulso de ar reverso; e) fluxo de ar reverso.

Adaptado de THEODORE e BUONICORE (1988)

Como resultado tem-se o acréscimo gradual da perda de carga residual, de modo que os valores da perda de carga do filtro imediatamente após a limpeza são superiores à perda de carga de um filtro que ainda não foi utilizado (DONOVAN, 1995).

Como já citado, este comportamento é decorrente do fato de não ser possível a remoção completa das partículas retidas entre as fibras.

A Figura 2.14 ilustra um ciclo utilizando limpeza por fluxo de ar reverso, apresentando o direcionamento do fluxo de ar e a limpeza incompleta, que ocorre no tecido, caracterizada principalmente pela limpeza aos pedaços.

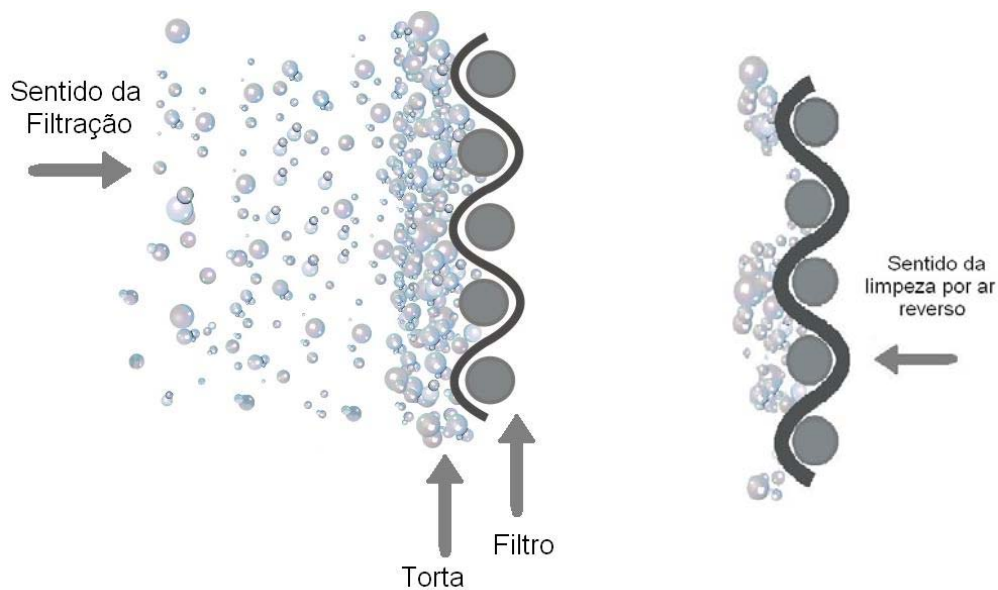


Figura 2.14: Ciclos de filtração e limpeza por ar reverso

2.2.2.1 Mecanismos de Descolamento da Torta

Teoricamente, durante o processo de limpeza era de se esperar que a torta fosse removida uniformemente em todas as partes do tecido, pela imposição de uma força suficiente para romper as forças de coesão entre as partículas e as forças de adesão entre o tecido e a torta. No entanto, muitas são as variáveis envolvidas neste processo e que interferem no mesmo, entre as quais pode-se citar: as propriedades superficiais do filtro, as propriedades químicas e estruturais das partículas, as propriedades elétricas das partículas e do tecido e a influência da umidade.

Em se tratando de limpeza de filtros de tecido, é freqüente o descolamento de partes da torta, e muitas vezes apenas uma fina camada permanece aderida ao tecido (KAVOURAS e KRAMMER, 2003). Este fenômeno é conhecido como “patchy cleaning” ou limpeza em blocos. Alguns autores atribuem este comportamento ao fato de que a tensão aplicada para a remoção se concentra em falhas ou desuniformidades da torta, gerando rachaduras que se propagam (KOCH et al. 1993). Autores como DENNIS e KLEMM (1980) atribuem o fato às irregularidades da força de adesão na interface torta-tecido, resultando em áreas mais fracamente aderidas ao mesmo. A limpeza em blocos resulta tanto na distribuição desigual da espessura da torta, quanto em uma velocidade não uniforme no ciclo seguinte (KAVOURAS e KRAMMER, 2003),

interferindo na formação da nova torta após a limpeza, e na perda de carga (DITTLER e KASPER, 1999).

Atualmente, o estudo sobre o comportamento da limpeza em blocos está se difundindo e alguns perfis já podem ser estabelecidos através destes trabalhos. Desta forma pode-se afirmar que, quanto maior a coesão entre as partículas, maior são as partes removidas (CALLÉ et al. 2002b). Evidências experimentais mostram ainda que o tamanho das partes da torta descoladas aumenta também com a carga mássica depositada por unidade de área filtrante (KOCH et al., 1993).

TIENI et al (2005) verificou que ocorreu um aumento no tamanho dos blocos removidos com um aumento da perda de carga máxima, ou seja, com a espessura da torta, além de haver um aumento do número de pedaços removidos também com o número de ciclos.

KOCH et al. (1996) verificaram que, após a limpeza, partes da torta permaneciam fracamente aderidas ao meio filtrante, apesar de não apresentarem quase nenhum contato superficial. Além disso, essas partes, embora não proporcionassem quase nenhuma contribuição para a perda de carga no sentido da limpeza, quando a filtração era restabelecida, elas aderiam novamente ao tecido, aumentando a perda de carga residual. Este fato revela que nem toda a perda de carga residual é resultado da permanência de partículas no interior do tecido, evidenciando a interferência da limpeza em blocos na filtração seguinte. Segundo MAUSCHITZ et al. (2004), a perda de carga residual poderia ser dividida em duas frações: a primeira constituída por partículas depositadas nas camadas próximas à superfície do meio filtrante, responsáveis pela resistência da colmatação no interior do meio filtrante; e a segunda composta pelas partículas depositadas na camada externa do filtro, consistindo da torta remanescente.

Além disso, MAUSCHITZ et al. (2004) afirmaram que durante a limpeza há um processo de reorganização interna das partículas no meio filtrante, que se inicia com o deslocamento de partículas, ou de aglomerados de partículas, seguido da difusão ou deslocamento destas partes no interior do meio para regiões onde terão menor influência no escoamento de gás no ciclo seguinte. Esta nova configuração interna causaria menor perda de carga que as partículas em sua configuração original, antes da limpeza. Para quantificar este efeito de reorientação, os autores definiram o fator de rearranjo, como mostra a Equação (2.4).

$$\Lambda = \frac{\Delta P_c - \Delta P_m}{\Delta P_c} \quad (2.4)$$

em que: Λ é o fator de rearranjo, adimensional; ΔP_m é a perda de carga medida após a limpeza (Pa); e ΔP_c é a perda de carga comparativa para a mesma massa de pó coletada durante a formação da torta (Pa).

KANAOKA et al. (2001) verificaram também que o aumento da rugosidade em filtros cerâmicos produz fragmentos menores de torta na limpeza por pulso de ar a alta pressão. Segundo os mesmos autores, a remoção da camada de pó em lâminas ou grandes aglomerados tem como vantagem a redução do problema de reentrância das partículas, resultando em uma maior eficiência de limpeza.

No trabalho de KOCH et al (1993) ficou comprovado que, na filtração em meios rígidos com limpeza por fluxo reverso, a tensão de descolamento da torta diminui significativamente com o aumento da carga mássica, quando esta apresenta baixos valores (entre 100-500 g/m²) e menos significativamente para valores maiores (>500 g/m²). Os autores atribuíram o comportamento das baixas cargas à descontinuidades na formação e descolamento parcial da mesma. Porém, MORRIS e ALLEN (1996) trabalhando com meios flexíveis de poliéster chamuscado, verificaram que a adesão aumentava com o aumento da massa de torta por área.

Ainda com relação à rigidez do material filtrante, CALLÉ et al. (2002a) apresentaram resultados de ensaios em dois filtros de poliéster, sendo que um possuía uma densidade de empacotamento duas vezes maior que outro. Pelos experimentos os autores puderam concluir que o filtro mais rígido (ou mais densamente empacotado) teve um melhor desempenho na regeneração, quando sujeito às mesmas condições que o filtro mais leve.

A permeabilidade do filtro, por sua vez, foi analisada em filtros cerâmicos por KANAOKA et al. (2001), cujo resultado encontrado revelou 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. Além disso, os autores concluíram que os ciclos de filtração foram mais longos para filtros de maior permeabilidade.

MARTINS (2001a) verificou ainda que a permeabilidade dos meios filtrantes diminuía com os ciclos de filtração, conforme ocorria o acúmulo de material particulado.

2.2.3 CRITÉRIO DE DESEMPENHO

Em linhas gerais, os parâmetros principais que caracterizam o desempenho de um filtro são a eficiência de coleta, a perda de carga, a vida útil e o custo do tecido (MAYER et al., 1998). Conforme DULLIEN (1989) deve-se considerar que a eficiência de coleta aumenta com o decorrer da filtração por causa da retenção de partículas no meio. Sendo assim, deve-se investigar o comportamento do tecido quando do processo de filtração e limpeza e não simplesmente considerar suas propriedades sem testes preliminares (CALLÉ et al., 2002a), uma vez que o acúmulo de partículas no meio minimiza significativamente as diferenças de eficiência, que geralmente já são pequenas entre dois tecidos.

Torna-se necessário ressaltar que o comportamento da filtração está diretamente relacionado à natureza química e física das partículas, à sua distribuição granulométrica, ao tipo do elemento filtrante, às propriedades do gás e às condições operacionais. Assim, para a seleção correta do tecido, deve-se observar tanto seu material e modo de confecção quanto analisar a compatibilidade do mesmo com o material a ser removido (BARNETT, 2000), verificando suas características físicas e químicas. Além disso, parâmetros como umidade da corrente gasosa, temperatura, tamanho das partículas, vazão de ar, abrasividade das partículas e técnica de limpeza devem ser observados para a escolha do filtro a ser utilizado.

2.3 ASPECTOS RELEVANTES NA FILTRAÇÃO

A seguir será realizada uma discussão sobre os fatores mais relevantes a serem considerados neste estudo de filtros de tecido.

2.3.1 *QUEDA DE PRESSÃO NA FILTRAÇÃO*

Quando se inicia um novo ciclo de filtração, a perda de carga através do filtro se encontra em um valor bem abaixo daquele imediatamente anterior à limpeza, mas ligeiramente superior ao valor inicial, correspondente ao filtro limpo e virgem. Como justificado anteriormente, isso se deve ao fato de, por mais eficiente que seja a limpeza, algumas partículas não são removidas, permanecendo nos interstícios do tecido (WILDER e BILLINGS, 1970b). De acordo com AGUIAR (1991), no início da filtração pode-se notar um comportamento não linear da queda de pressão com o tempo, sendo que este comportamento tende a se linearizar após a formação da torta. Esta observação é confirmada pelo trabalho de SCHIMIDT (1995), que constatou um período de transição inicial, sendo que o tempo de duração da deposição das partículas no interior do tecido foi apenas de alguns segundos, seguido por outra fase em que a permeabilidade permaneceu constante, sem alteração da torta. Porém, com o decorrer do tempo de filtração, o autor notou um afastamento da linearidade, com aumento do coeficiente angular, e atribuiu a isso à compressibilidade da torta.

No entanto, alguns trabalhos encontrados na literatura apresentaram curvas de filtração com decréscimo do coeficiente angular, algum tempo após a formação da torta, ou seja, a perda de carga diminuía para uma dada quantidade de massa depositada. SILVA et al. (1999) atribuíram este comportamento a uma diminuição da resistência específica da torta e da porosidade da mesma, determinada experimentalmente.

Deve-se esclarecer a diferença entre a perda de carga do tecido limpo, a perda de carga crítica (máxima), que indica o momento da limpeza, e a perda de carga residual, que é a diferença de perda de carga do filtro novo e do filtro após a limpeza.

A perda de carga residual tende a aumentar após cada ciclo, como citado anteriormente, pelo crescente acúmulo de partículas no tecido (DULLIEN, 1989). Após vários ciclos este valor tende a se estabilizar, indicando uma “quantidade de equilíbrio de pó” no tecido, ou uma saturação do mesmo, que depende do tipo do material do filtro, do tamanho das partículas e do tempo e tipo de sistema de remoção da torta (CALLÉ et al, 2002b). Porém, segundo KOCH et al. (1996) e STÖCKLMAYER e HÖFLINGER (1998a), em alguns casos este equilíbrio pode nunca ser atingido, sendo que a operação prossegue até que a vazão de ar não possa mais ser mantida por muito

tempo, sob condições adequadas de perda de carga, tornando o processo impraticável, e conseqüentemente, sendo necessário a troca do tecido.

Duas equações são tradicionalmente empregadas para avaliar o escoamento de fluidos em meios porosos, sendo que ambas relacionam os valores de perda de carga com a velocidade superficial. Estas equações são apresentadas a seguir e são conhecidas como equações de Darcy (Equação 2.5) e de Forchheimer (Equação 2.6):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot V \quad (2.5)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot V + \frac{\rho}{k_2} \cdot V^2 \quad (2.6)$$

sendo que, L é a espessura do meio filtrante, μ é a viscosidade do fluido e ρ a densidade, o termo $\frac{\mu}{k_1} \cdot V$ representa os efeitos viscosos, enquanto o termo $\frac{\rho}{k_2} \cdot V^2$ representa os efeitos cinéticos ou inerciais.

Para os casos de escoamentos puramente viscosos, a equação (2.5) pode ser utilizada. Nesta equação, a constante k_1 é conhecida como sendo o constante de permeabilidade do meio poroso. Com o aumento da velocidade de escoamento, a equação de Darcy deixa de ser satisfatória, já que os efeitos inerciais tornam-se importantes e precisam ser considerados. Nestes casos observa-se um comportamento parabólico da perda de carga em relação à velocidade superficial, sugerindo-se o uso da Equação (2.6) para caracterizar o sistema. Por meio da utilização da equação mais adequada para as condições de operação, pode-se obter valores experimentais da permeabilidade para cada meio filtrante.

De acordo com INNOCENTINI et al. (1999), a equação de Forchheimer é amplamente aplicada para uma larga faixa de velocidades e em muitos leitos porosos. No entanto, os referidos autores testaram a importância do parâmetro não-linear ou inercial, verificando se o mesmo poderia ou não ser desconsiderado. Para tal, foi utilizado um parâmetro de comparação, o número de Forchheimer, Fo , que relaciona as

forças viscosas e cinéticas que contribuem para a perda de carga, apresentado pela Equação 2.7:

$$Fo = \frac{\rho V}{\mu} \left[\frac{k_1}{k_2} \right] \quad (2.7)$$

Desta forma, para $Fo \ll 1$, a Equação (2.6) pode ser reduzida à equação (2.5), enquanto que para $Fo = 1$, a desconsideração do termo quadrático da equação ocasiona desvios de até 50% do valor real da permeabilidade.

Quando se opera com fluidos compressíveis, deve-se quantificar a influência da compressibilidade do gás nas equações de permeabilidade. A integração das formas diferenciais das equações de Darcy e Forchheimer resulta nas Equações (2.8) e (2.9) respectivamente:

$$\frac{Pe^2 - Ps^2}{2 \cdot P \cdot L} = \frac{\mu}{k_1} \cdot V \quad (2.8)$$

$$\frac{Pe^2 - Ps^2}{2 \cdot P \cdot L} = \frac{\mu}{k_1} V + \frac{\rho}{k_2} V^2 \quad (2.9)$$

sendo, P_e e P_s , respectivamente, a pressão na entrada e na saída da amostra sob ensaio. A pressão P corresponde à pressão na qual V , ρ e μ são medidos e calculados. Estas equações são válidas para o escoamento de gases, quando os efeitos da compressibilidade são significativos para a queda de pressão.

Pela Lei de Davies, a perda de carga em um filtro fibroso limpo pode também ser descrita pela Equação (2.10) (THOMAS et al., 2001):

$$\frac{\Delta P}{L} = 64 \cdot \mu \cdot V_f \cdot \frac{\alpha^{3/2} \cdot (1 + 56 \cdot \alpha^3)}{d_f^2} \quad (2.10)$$

Para a determinação da perda de carga de um filtro colmatado, a Lei de Davies modificada torna-se a Equação (2.10):

$$\frac{\Delta P}{L} = 64 \cdot \mu \cdot V_f \cdot L \cdot \left(\frac{\alpha}{d_f^2} + \frac{\alpha_p}{d_p^2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\alpha}{d_f} + \frac{\alpha_p}{d_p} \right) \quad (2.11)$$

em que se considera os diâmetros das partículas constituintes da torta, e os dendritos formados pelas mesmas como sendo novos elementos coletores. Nestas equações, α = densidade de empacotamento do filtro (adimensional); α_p = densidade de empacotamento da torta (adimensional); V_f = velocidade de filtração; d_f = diâmetro de fibras; d_p = diâmetro de partículas.

De modo semelhante, em MATTESON e ORR (1987), a pressão total de filtração (ΔP_T) é definida como sendo a soma da queda de pressão do meio filtrante (ΔP_M) com a queda de pressão da torta (ΔP_C), como apresentado na Equação (2.12).

$$\Delta P_T = \Delta P_C + \Delta P_M \quad (2.12)$$

Como a perda de carga através da torta é dependente da velocidade de filtração, V_f , e da massa de pó depositada por unidade de área, W , têm-se as Equações (2.13) e (2.14):

$$\Delta P_C = K_2 \cdot V_f \cdot W \quad (2.13)$$

$$\Delta P_M = K_1 \cdot V_f \quad (2.14)$$

sendo que a constante de proporcionalidade K_1 é a resistência específica do meio filtrante e K_2 é a resistência específica da torta, relacionada com o tamanho das partículas, com a porosidade da torta e com a velocidade do gás; e ΔP_M é uma função linear da velocidade e igual à permeabilidade do meio filtrante vezes a velocidade. Como no caso de tortas de filtração a espessura da mesma (L') varia com o tempo de filtração, pode-se admitir que, no caso de tortas incompressíveis:

$$W = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon_c) \cdot L' \quad (2.15)$$

portanto:

$$L' = \frac{W}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon_c)} \quad (2.16)$$

Deste modo pode-se obter K_2 experimentalmente através do aumento da queda de pressão no filtro devido ao acúmulo de material pulverulento no meio (LEITH e ALLEN, 1986), representado pela Equação (2.17):

$$K_2 = \left(\frac{A}{V_f} \right) \left(\frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{M_2 - M_1} \right) \quad (2.17)$$

em que:

K_2 : resistência específica da torta (s-1)

A : área de filtração (m^2)

V_f : Velocidade de filtração (m/s)

ΔP_1 e ΔP_2 : perda de carga nos pontos 1 e 2 da parte linear da curva de filtração (Pa)

M_1 e M_2 : massa acumulada por unidade de área nos pontos 1 e 2 (kg/m^2)

Substituindo as Equações (2.13) e (2.14) na Equação (2.12) e rearranjando-a, tem-se a Equação (2.18):

$$\frac{\Delta P_T}{V_f} = K_1 + K_2 \cdot W = S_0 + S_2 \quad (2.18)$$

em que a razão $\Delta P_T/V_f = S$, é conhecida por arraste do filtro.

O arraste efetivo (S) pode ser definido como a resistência do filtro, ou seja, a perda de carga por unidade de velocidade de filtração (STRANGERT, 1977). Experimentalmente se verifica que, para os estágios iniciais da deposição inicial de partículas, o arraste não é uma função linear, como apresenta a Equação (2.18). O arraste, em um ponto qualquer nas condições iniciais de filtração (S_E), pode ser calculado pela extrapolação da parte linear da curva até o ponto desejado, como demonstra a Figura 2.15.

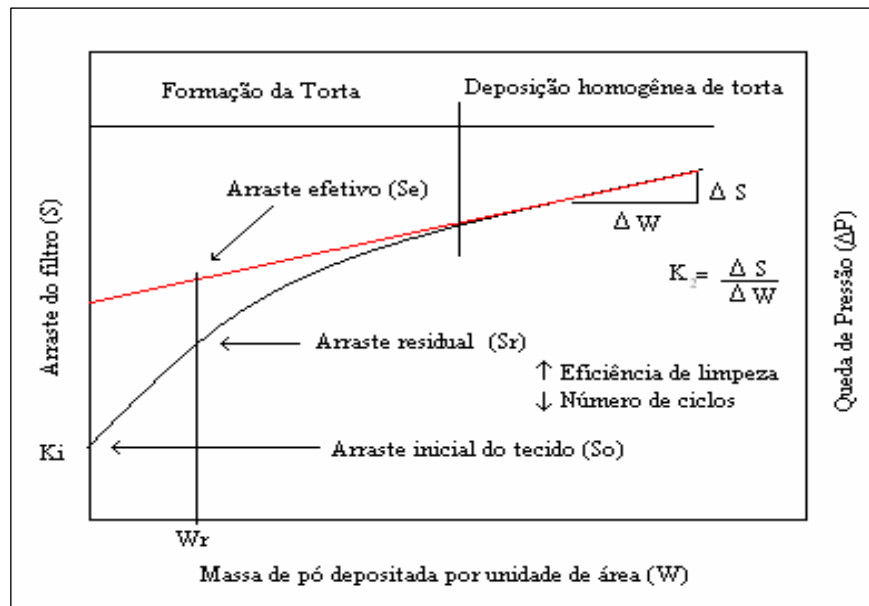


Figura 2.15: Determinação do arraste efetivo nos estágios iniciais da filtração. Modificado de DONOVAN, 1985.

Logo, o arraste efetivo pode ser calculado como mostra a Equação (2.19), em que W_R é a massa residual de pó por unidade de área, determinado experimentalmente:

$$S = \frac{\Delta P}{V_f} = S_E + K_2 \cdot (W - W_R) \quad (2.19)$$

Para os ciclos consecutivos de operação de um filtro obtém-se uma série de curvas semelhantes, sendo o arraste cada vez mais pronunciado (STRANGERT, 1977), dependendo da eficiência de limpeza. Segundo STRANGERT (1977) a resistência efetiva da torta é dada pelo coeficiente angular da curva, de modo que a estrutura do tecido interfere muito pouco ou nada no valor do arraste.

Conforme DENNIS e KLEMM (1982), a equação (2.19) pode caracterizar adequadamente ou não tecidos trançados, sendo o ajuste dependente do tempo de utilização do tecido (uma vez que em tecidos usados a curva é praticamente toda linear) e da compressibilidade da torta.

2.3.2 FRAÇÃO LIMPA

A fração limpa é um dos parâmetros de caracterização do “patchy cleaning” ou da limpeza em blocos. É um parâmetro utilizado para caracterizar a limpeza e pode ser definido como sendo a razão entre área limpa pela área total (CALLÉ et al., 2002b), ou a massa removida pela massa total (CALLÉ et al., 2002b), como apresenta a Equação (2.20).

$$f_{mr} = \frac{M_d}{M_t} \quad (2.20)$$

em que: f_{mr} é a fração de massa removida, M_d é a massa desprendida na limpeza, M_t é a massa total de pó no filtro, após a filtração.

ELLEMBECKER E LEITH (1981) mostraram que, para feltros, a fração limpa diminuiu com o número de ciclos conforme a potência. Segundo o trabalho de MOREIRA (1998) houve uma brusca variação da perda de carga residual quando era removida entre 0 e 20% da torta, sendo que, o aumento da fração removida a partir deste valor provocava pouca variação da perda de carga, mesmo para altos índices de remoção de torta. Assim, para valores superiores a 20% a perda de carga residual deixaria de ser um bom parâmetro de referência de limpeza do filtro.

No trabalho de MOREIRA et al., (1999) os autores sugerem que a eficiência de limpeza seja observada preferencialmente pelas curvas de filtração, do que pela perda de carga residual. Os autores demonstraram que, exceto para o primeiro ciclo, a linearidade das curvas para um feltro de poliéster pode ilustrar melhor a eficiência de limpeza, de modo que se a concavidade da curva de filtração posterior a uma limpeza for para baixo (indicando um rápido aumento da perda de carga) a limpeza foi deficiente, enquanto que curvas de comportamento similar ao do primeiro ciclo, ou seja, quase lineares, indicariam uma limpeza satisfatória.

TIENI (2005) verificou a influência da velocidade de limpeza (5 a 16 cm/s) e da perda de carga máxima de filtração (1000 a 3000 Pa) sobre a eficiência de remoção, em termos de fração de massa removida e em termos de fração de área removida. O autor observou que a fração mássica removida aumentou com o aumento da perda de carga máxima, indiferentemente da velocidade de limpeza empregada, uma vez que a

torta formada era mais espessa para maiores perdas de carga máxima. Além disso, o autor verificou que a maior velocidade de limpeza não foi a que resultou na maior eficiência de remoção de pó, sendo que a mesma tornava-se praticamente constante para velocidades de limpeza maiores que 13 cm/s. A fração de área removida, no entanto, apresentou tendência a se tornar constante com o número de ciclos, quando se utilizam maiores perdas de carga máxima.

2.3.3 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO (A)

A densidade de empacotamento pode ser descrita como a fração de volume total do elemento filtrante efetivamente ocupada por fibras, conforme a Equação (2.21) (DONOVAN, 1985):

$$\alpha = \frac{m_f}{\rho_f \cdot L} = \frac{\text{volume.da.fibra}}{\text{volume.total}} = 1 - \varepsilon \quad (2.21)$$

em que α é a densidade de empacotamento do filtro (adimensional), m_f é a densidade mássica por área do filtro, ρ_f é a densidade da fibra, L é a espessura do filtro e ε é a porosidade do filtro.

De modo geral, o aumento da densidade de empacotamento se reflete em uma menor penetração de partículas, uma vez que assim se aumenta a tortuosidade do gás (YLITUOMI et al., 1995) e nestes tecidos com maior densidade há menos espaço disponível para as partículas se depositarem (WALSH, 1996). Pelo mesmo motivo, a perda de carga também aumenta com a densidade de empacotamento.

2.3.4 UMIDADE

A umidade relativa durante a filtração tem ainda um papel pouco claro no perfil de perda de carga durante o processo. Conforme DURHAM e HARRINGTON (1971), o aumento da umidade resultou em um decréscimo da perda de carga para

partículas de cinza (fly ash), mas não verificaram alteração neste parâmetro para filtrações utilizando cimento, sílica amorfa ou calcário. Por outro lado, os experimentos de AIRMAN e HELFRITCH (1977) mostraram que o aumento da umidade provocou uma queda na perda de carga não apenas para a cinza, mas também para a sílica e rocha asfáltica.

Na tentativa de esclarecer este comportamento, GUPTA et al. (1993) realizaram vários estudos e verificaram que partículas não higroscópicas, como óxido de alumínio, apresentaram um decréscimo da resistência específica com o aumento da umidade, sendo este decréscimo evidente, nas partículas em torno de 0,5 μm , apenas para umidades acima de 90%, sendo evidente para toda a faixa de umidade nas partículas de 1,0 μm , sendo estes resultados não explicados. As partículas higroscópicas utilizadas (NaCl) mostraram uma queda de K_2 para ambos os diâmetros estudados.

Estudos correlatos foram desenvolvidos por MIGUEL (2003). O autor testou filtros de poliéster sob condições de umidade variadas e os seus resultados mostraram que a variação desta condição não afetou o valor da permeabilidade para um filtro de poliéster limpo. Durante o processo de filtração, o autor comparou a operação utilizando dois tipos distintos de partículas: partículas higroscópicas (NaCl) e não higroscópicas (alumina), variando-se a umidade em cada ensaio. Os resultados obtidos revelaram que houve um decréscimo da perda de carga com o aumento da umidade e, conseqüentemente, um aumento da permeabilidade do meio. Este aumento foi mais significativo para as partículas não-higroscópicas quanto submetidas a altas umidades (61 – 90%) e para as partículas de NaCl (higroscópicas) a maior variação de permeabilidade foi observada para umidade variando entre 32%-53%. O autor justificou este comportamento afirmando que maiores umidades alteram a agregação das partículas, criando arranjos de partículas mais compactos no interior do filtro. A eficiência também foi afetada pelo aumento da umidade, apresentando valores mais satisfatórios.

2.3.5 VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO

Diversos trabalhos na literatura estudaram a influência da velocidade de filtração durante o processo, sendo que, em linhas gerais, o que se observa é o aumento

da perda de carga com o aumento da velocidade de filtração (DAVIS e KIM, 1999). REMBOR e KASPER (1996) testaram o efeito do aumento do número de Stokes aumentando a velocidade de filtração e também aumentando o diâmetro de partículas. Os autores verificaram que, operando-se um sistema com Stokes entre 9 e 16 (regime de interceptação/impactação), aumentando-se o número de Stokes pelo aumento da velocidade de filtração de 0,3 até 1,2 m/s, a perda de carga e a eficiência do filtro, para partículas de 1 μ m, aumentavam. No entanto, o aumento do número de Stokes através do aumento do diâmetro de partículas tornou menos evidente esta tendência, suavizando este aumento.

A velocidade de filtração foi avaliada nos experimentos de YLITUOMI et al. (1995), para diferentes números de Stokes. Os autores verificaram que, para baixas velocidades, no caso 15 cm/s, a penetração através do filtro diminuía com o aumento do diâmetro das partículas. Porém, quando o sistema foi operado com maiores valores de velocidade, a penetração inicialmente diminuiu com o aumento do diâmetro de partículas e posteriormente aumentou, quando os efeitos inerciais passam a agir como mecanismo predominante.

THOMAS et al. (2001) avaliaram a influência da velocidade de filtração em filtros de fibra de vidro, para uma faixa entre 1 e 50 cm/s. Conforme seus resultados, o coeficiente angular da parte linear da curva de filtração foi tanto maior quanto maior a velocidade de filtração. Com a finalidade de verificar se este comportamento poderia ser atribuído apenas à diferença de velocidades, os autores traçaram curvas que relacionavam a perda de carga e a velocidade ($\Delta P/V$) de filtração em função da massa depositada. Como as curvas eram coincidentes, os autores concluíram que a velocidade de filtração não afetou a forma como as partículas se depositavam nos tecidos.

SILVA NETO et al. (1999) verificaram que o aumento de perda de carga provocado pelo aumento da velocidade de filtração, numa faixa compreendida entre 5 e 15 cm/s, não foi proporcional. Os autores comprovaram que, para um acréscimo de 5 para 10 cm/s na velocidade, a taxa de aumento de perda de carga foi maior quando comparado ao aumento de perda de carga resultante do aumento de velocidade de 10 para 15 cm/s.

CHENG e TSAI (1998) verificaram que, para velocidades de filtração entre 1 e 9 cm/s, houve um acréscimo da resistência específica da torta proporcional ao

aumento da velocidade. Esta tendência da resistência específica da torta aumentar foi observada também nos estudos de SILVA et al. (2000)

Com relação à porosidade da torta, SILVA et al. (2000) verificaram que a porosidade da torta diminuiu com o aumento da velocidade de filtração dentro de uma faixa de 7,5 a 15,5 cm/s, tendendo a um valor constante para altas velocidades. De acordo com SILVA et al. (1997) este fato pode ser atribuído à compressibilidade da torta. ITO (2002) demonstrou também que a velocidade de filtração interferiu 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.

2.3.6 CARGA MÁSSICA APLICADA OU CONCENTRAÇÃO DE ENTRADA

A variável concentração de entrada foi avaliada por THOMAS et al. (2001), aplicando-se concentrações entre 5 e 21 mg/m³. Em seus experimentos, os autores não verificaram nenhuma variação do comportamento da perda de carga com a concentração aplicada. Além disso, não houve diferenças do perfil de penetração de partículas em função desta variável.

No entanto, SILVA et al (2000), utilizando vazões de alimentação de 0,072 e 0,110 e 0,148 g/s, verificaram que a mesma resultou em diferenças muito pequenas na porosidade e resistência específica da torta, para uma dada velocidade de filtração. Porém, os autores verificaram que o efeito da vazão mássica de pó associado ao efeito da velocidade de filtração alteram significativamente estes dois parâmetros.

2.3.7 POROSIDADE DO MEIO FILTRANTE E DIÂMETRO DE POROS

A porosidade é um parâmetro estrutural do meio filtrante que corresponde à relação de vazios presentes no meio. A porosidade total (ϵ_t), que contabiliza poros que

contribuem e que não contribuem para o escoamento (poros abertos e poros fechados), é obtida pela Equação (2.22)

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_s} \quad (2.22)$$

em que ρ_s a densidade do sólido, ρ_g a densidade total do meio (ρ_g = massa de sólidos/volume total da amostra).

A porosidade dos meios pode também ser obtida por meio de equacionamentos bem estabelecidos na literatura. É o caso da equação proposta por ERGUN (1952), largamente aplicada para leitos granulares com porosidade entre 0,1 e 0,75, e para partículas com diâmetro entre 10^2 e $10^4 \mu\text{m}$ e número de Reynolds de partículas maiores que a unidade. A equação (2.23) expressa essa correlação.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu V}{d_p^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho V^2}{d_p} \quad (2.23)$$

Nesta equação ρ é a densidade do gás, μ é a viscosidade do gás, V é a velocidade superficial do fluido, d_p é o diâmetro da partícula (diâmetro de Stokes), L é a espessura do meio. Mesmo para partículas muito pequenas (1 a 10 μm) e número de Reynolds da ordem de 10^{-2} , esta equação pode ser utilizada sem problemas.

No trabalho de MAUSCHITZ et al. (2004), os autores verificaram que filtros de feltro de poliéster mais porosos (85%) apresentaram maior retenção de partículas que o filtro de menor porosidade (51%). Segundo os autores, as partículas foram acomodadas mais na superfície do filtro menos poroso por causa da presença dos “*hot spots*”, ou pontos fundidos pelo tratamento superficial mais intenso sofrido por este tecido de menor porosidade. Além disso, esses pontos apresentaram forças de adesão mais fraca, facilitando a remoção e minimizando a massa retida após a limpeza.

Conforme trabalho publicado por JAPUNTICH et al. (1994), utilizando filtros de papel, 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 filtros testados, o que indicou que o perfil da perda de carga desta

fase independia da estrutura do tecido, para uma dada velocidade de filtração e diâmetro de partículas.

2.3.8 POROSIDADE DE TORTAS DE FILTRAÇÃO

Do mesmo modo que a porosidade dos meios filtrantes, a porosidade da torta pode ser obtida utilizando-se a equação de Ergun, considerando-se como L a espessura da torta depositada. Por ser de difícil determinação experimental, a espessura da torta é considerada como sendo (AGUIAR, 1995):

$$M = Qt = L' \cdot A \cdot \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.24)$$

em que M é a massa de torta, Q é a vazão mássica, A a área superficial da torta, e ρ_p a densidade da partícula. Isolando-se L' da equação da equação 2.24 e substituindo na de Ergun (2.23), tem-se:

$$\Delta P = \left[\frac{150 \cdot Q \cdot \mu \cdot V}{A \cdot \rho_p \cdot d_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} + \frac{1,75 \cdot Q \cdot \rho_p \cdot V^2}{A \cdot \rho_p \cdot d_p} \cdot \frac{1}{\varepsilon^3} \right] \cdot t \quad (2.25)$$

que fornece o valor da porosidade média da torta.

NEGRINI et al. (1998) verificaram que a porosidade da torta aumentava da interface torta-tecido para a interface torta-ar, e diminuía com o aumento da espessura da torta, indicando uma compactação da mesma. SILVA et al. (2000) verificaram também que o aumento da velocidade de filtração provocou uma diminuição da porosidade, tendendo a um valor constante para altos valores de velocidade de filtração.

2.3.9 DIÂMETRO E FORMA DAS PARTÍCULAS

Segundo REMBOR e KASPER (1996), partículas de pequeno diâmetro provocam maiores perdas de carga e maior grau de penetração que as partículas de maiores diâmetros, sendo o diâmetro o responsável pela inclinação da reta

correspondente à terceira fase da filtração (JAPUNTICH et al., 1994). Estes resultados foram confirmados no trabalho de AGUIAR e COURY (1996). Os maiores valores de perda de carga são devidos a maior área superficial das partículas menores, produzindo um recobrimento mais efetivo das fibras (JAPUNTICH et al., 1994; WALSH, 1996; THOMAS et al., 2001).

Outra constatação é referente à porosidade da torta formada. AGUIAR e COURY (1996) verificaram que, sob as mesmas condições, a porosidade da torta era maior para partículas de menor tamanho. Este fato foi atribuído às forças de interação, como Van der Waals e eletrostáticas, que agem em partículas menores e formam tortas mais porosas.

Analisando a influência do diâmetro de partículas sobre a eficiência do sistema, e considerando-se a eficiência de coleta de uma fibra simples, pode-se afirmar que a eficiência apresenta um valor de mínimo na região onde há a ação de mais de um mecanismo de coleta. Esta situação ocorre porque as partículas são muito grandes para serem coletadas por difusão e muito pequenas para serem coletadas por impactação e interceptação, como mostra a Figura 2.16.

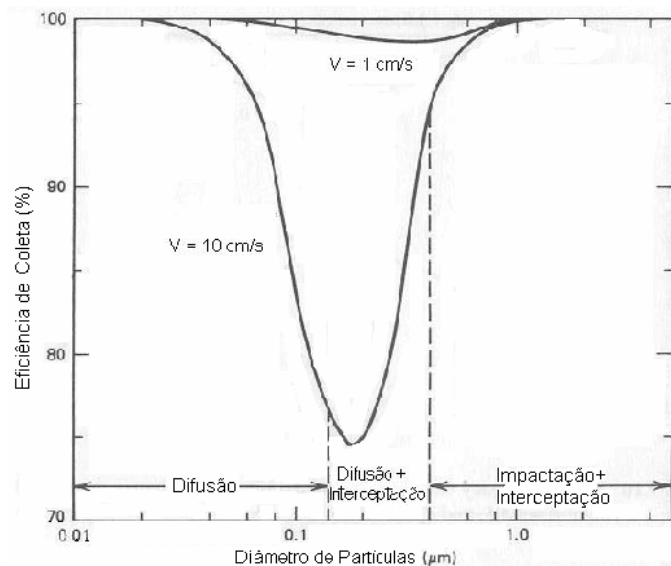


Figura 2.16: Eficiência de coleta em função da velocidade de filtração e diâmetro de partículas

Fonte: HINDS, 1999

Além disso, materiais com faixa de distribuição granulométrica mais ampla provocam maior perda de carga pela acumulação de partículas menores entre as partículas maiores (ITO, 2002).

WALSH e STENHOUSE (1997) verificaram que quanto maior o diâmetro de partículas, maior o ponto de colmatação resultante na filtração, ou seja, com partículas menores o ponto de colmatação é alcançado mais rapidamente, pois os dendritos são formados mais rapidamente, aumentando a perda de carga e, portanto, a torta é formada com menor massa depositada.

A influência da forma das partículas foi discutida no trabalho de ITO (2002). Neste trabalho o autor utilizou como materiais pulverulentos o amido de milho e o polvilho doce, materiais estes que possuíam distribuição granulométrica e densidade muito próximas. No entanto, o polvilho doce apresentava partículas quase esféricas, enquanto o amido de milho era constituído por partículas com formatos irregulares. Nos ensaios de filtração realizados, a taxa de aumento da perda de carga com o tempo foi superior para polvilho, e a porosidade das tortas formadas pelo polvilho doce apresentou valores menores. O autor considerou que a esfericidade das partículas estava influenciando na compactação da torta formada, de modo que partículas mais irregulares resultaram em tortas de maior porosidade.

2.3.10 DIÂMETRO DE FIBRAS

Segundo CLARK (2001), a eficiência de coleta de um feltro aumenta com o decréscimo do diâmetro das fibras que o constituem.

De modo geral, mantendo-se a densidade do feltro, tem-se, com a redução do diâmetro das fibras, um comprimento total maior de fibra, uma maior área superficial e a redução dos poros.

Nos resultados do trabalho de LISOWSKI et al., (2001), utilizando filtros de fibras cortadas de polipropileno, ficou evidente o decréscimo da perda de carga com o aumento do diâmetro das fibras.

2.3.11 EFEITOS DE CARGAS ELETROSTÁTICAS

Segundo BROWN (1998), as cargas dos filtros eletricamente carregados alteram a estrutura, o desenvolvimento e a estabilidade dos dendritos, geralmente aumentando a eficiência do sistema e reduzindo a resistência ao ar.

Quando um filtro é submetido à ação de um campo elétrico, os dendritos formados, que tendem a recobrir as fibras de maneira mais uniforme, são também menos densamente empacotados, proporcionando assim, menos resistência à passagem de ar (HENRY e ARIMAN, 1986).

Segundo WANG (2001) a aplicação de forças eletrostáticas aumentam a eficiência dos filtros, principalmente na faixa de 0,2 a 0,5 μm , de difícil captura por outros mecanismos, além de possibilitar a coleta eficiente de partículas em filtros menos densamente empacotados (e, portanto com menores perdas de carga). Segundo o mesmo autor, fatores como a composição química das partículas e das fibras, a carga das partículas, a carga superficial das fibras e a intensidade do campo elétrico aplicado influenciam a eficiência de um sistema de filtração que opere com aplicação de forças eletrostáticas.

Além disso, os dendritos formados nestas condições, nos primeiros instantes de filtração promovem um aumento mais efetivo da eficiência, uma vez que agem como elementos coletores com o mesmo diâmetro das partículas a serem coletadas. O que ocorre na ausência das forças eletrostáticas é que os dendritos formados, apesar de também aumentarem a eficiência, produzem um aumento maior da perda de carga (WANG, 2001).

2.3.12 ESTUDOS COMPARATIVOS ENTRE DIFERENTES TECIDOS

A realização de tratamentos de finalização nos tecidos, como comentado anteriormente, tem por objetivo melhorar as condições de operação do meio filtrante. No entanto, LISOWSKI et al. (2001) verificaram que o tecido agulhado com 100 agulhas por centímetro apresentou quase o dobro da perda de carga de um tecido

agulhado com 50 agulhas por centímetro, ressaltando que os tratamentos devem ser baseados em estudos de desempenho.

Nos ensaios de CALLÉ et al. (2002a) com poliéster tratado termicamente, comprovou-se que tecidos tratados apresentaram menores valores de perda de carga residual no decorrer dos ciclos, bem como maior vida útil e maior facilidade de remoção da torta. GOLESWORTHY (1999) afirmou que a compressão térmica de feltros agulhados convencionais, com ou sem adesão de termoplásticos à fibra (rigidização) resultou em uma superfície mais lisa, com melhores características de liberação da torta e menor porosidade na superfície que na base, fornecendo assim um tecido com menor penetração de partículas.

POWELL (1998) recomendou o uso de filmes microporosos poliméricos na superfície de filtros (denominados filtros de superfície) com o intuito de evitar que as partículas penetrem no tecido, podendo ser emitidas na corrente de gás limpo e causando inclusive o bloqueio do meio. Ainda segundo o referido autor, logo que se forma uma fina camada de pó o sistema atinge a estabilidade, observada pelos valores de perda de carga, que se tornaram constantes. Este comportamento é oposto ao observado nos filtros convencionais, que apresentam um aumento mais lento da perda de carga com o tempo e que mesmo após vários ciclos de limpeza pode não se estabilizar, apenas aumentar. POWELL (1998) recomenda substituir um filtro convencional por um de superfície, quando o primeiro colmata rapidamente, obtendo-se normalmente uma redução da perda de carga no decorrer dos ciclos, e um aumento da vida útil do meio, pelo menor desgaste provocado pela maior frequência de limpeza.

No trabalho de HINDY et al. (1987) foram analisados filtros calandrados, chamuscados e com a superfície recoberta com membrana laminada. Os autores comprovaram que o filtro calandrado, ao contrário dos outros dois, possuía características negativas quanto à coleta e perda de carga residual. Testes realizados com os tecidos chamuscados e de membrana mostraram que o primeiro exibiu menor perda de carga residual, apesar de reter mais partículas em seu interior. A frequência de limpeza foi maior para o tecido calandrado que para os outros, sendo que ambos apresentaram valores semelhantes.

CALLÉ et al. (2002b) trabalharam com três feltros diferentes, sendo que o primeiro era constituído por fibras de poliéster trançado, denominado filtro C. O

segundo tipo de filtro, designado filtro D, recebeu um fino recobrimento com fibras de 0,2 μm , garantindo a filtração superficial, mas possuía densidade de empacotamento e diâmetro de fibras semelhante ao C. O terceiro tecido, o tecido T, possuía o dobro do valor de densidade de empacotamento dos tecidos C e D, caracterizando-o como um tecido mais rígido. Nos ensaios os autores utilizaram velocidade de filtração igual a 2cm/s. Para o tecido C, a primeira fase de filtração foi mais pronunciada, sendo praticamente inexistente para os tecidos T e D. A duração dos ciclos foi diminuindo para os tecidos C e T, mantendo-se constante para o tecido D, graças ao recobrimento. Os tecidos sem recobrimento apresentaram ainda, um aumento significativo da perda de carga residual ciclo a ciclo, tendendo a se estabilizar apenas para o tecido D.

A influência da estrutura e construção do tecido utilizado é comentada no trabalho de KOCH et al. (1996), sendo que os autores observaram em seus experimentos que o descolamento da torta era facilitado em tecidos chamuscados, livres de fibras preponderantes em sua superfície. Além disso, estes autores notaram uma forte influência da rigidez do tecido, sendo que a tensão de descolamento foi dez vezes menor para um poliéster chamuscado simples, que para um quimicamente endurecido. SIEVERT apud KOCH et al. (1996) explica este fato como consequência da transferência do movimento provocado pela operação de limpeza por todo o tecido, causando rachaduras na torta, sendo esta transferência mais efetiva para tecidos mais flexíveis.

SANCHEZ et al. (1997) realizaram um estudo comparativo entre tecidos trançados com fios de pêlos/poliéster (proporção de 45% / 55%) e feltros. Os ensaios com o material trançado foram realizados com tecidos que possuíam mesma trama (twill), mas diferentes números de fibras por fio, o que produziu tecidos com diferentes diâmetros e conseqüentemente diferentes densidades e espessuras. Os autores constataram que quando mais fino o fio de um tecido trançado, maior a perda de carga produzida. Os dois não-trançados utilizados eram uma aramida comercial de 2 mm de espessura e um poliéster de fabricação própria que apresentou perdas de carga quase três vezes menores que a aramida. Os testes de eficiência mostraram que nas condições operacionais, os feltros apresentaram melhor desempenho, seguidos dos tecidos de menor diâmetro de fio.

2.3.13 A PENETRAÇÃO DE PARTÍCULAS NO INTERIOR DOS MEIOS FILTRANTES

Ressalta-se neste ponto a diferença entre a penetração através do tecido, que é conhecida como inverso da eficiência, e a penetração no tecido. Aqui será feita uma revisão do estado da arte da penetração no tecido, ou seja, em seu interior, envolvendo a profundidade e a intensidade de penetração.

Nos casos onde a filtração interna não alcança valores adequados de remoção de partículas submicrômicas, existem trabalhos que recomendam o uso de membranas de recobrimento para o tecido, que tornam o processo exclusivamente uma filtração superficial, simulando com estas membranas a torta já formada (BARNET, 2002, POWELL, 1998; CALLÉ et al., 2002a). As membranas de recobrimento comumente utilizadas são as de politetrafluoroetileno, ou PTFE, que exibem boa liberação da torta, baixa perda de carga, vida útil elevada e menor custo (WEMMER, 1999). Este tipo de procedimento, além de evitar a penetração de partículas através do tecido, ou seja, além de promover sua eficiência, minimizam a penetração de partículas no tecido, impedindo que muitas partículas se acomodem no interior do meio filtrante.

A penetração de partículas em meios filtrantes é um fenômeno que pode ocorrer em maior ou menor grau, dependendo das características dos materiais envolvidos e condições operacionais.

WALSH (1996) afirmou que quanto maior a retenção de partículas no interior de filtros de fibra de vidro, antes da transição de filtração interna para filtração pela torta, melhor é o desempenho em termos de custos, uma vez que o aumento da capacidade de captação de partículas significa menor necessidade de troca de tecido e maior vida útil.

De acordo com CALLÉ et al. (2002a), após o primeiro ciclo, a eficiência de coleta de novas partículas é superior em relação ao filtro novo, devido à contribuição das partículas retidas no filtro, e não eliminadas na limpeza, na captação de novas partículas. Contudo, autores como GRZYBOWSKI e GRADÓN (1996) afirmaram que a filtração pelo meio (ou interna) é prejudicial para o processo, podendo causar inclusive a colmatação total do meio. Sabe-se, porém, que a presença de partículas retidas no filtro após a limpeza pode promover a eficiência do sistema, uma vez que estas partículas atuam como elementos coletores, sendo essencial quando ainda não se tem uma torta formada.

O que se observa, no entanto, é que deve haver bom senso ao considerar estes pontos, uma vez que o acúmulo excessivo de partículas provoca um aumento da perda de carga no próximo ciclo e resulta, conseqüentemente, em maior consumo energético.

De modo geral, admite-se que, para se obter uma remoção satisfatória, principalmente em materiais com ampla distribuição granulométrica, a torta deve ser formada o mais rápido possível (SCHMIDT, 1995), ou seja, uma filtração interna mais curta é sempre desejada. Tal condição pode ser alcançada quando se operam com maiores concentrações de material pulverulento, com partículas de maiores diâmetros, ou ainda, com baixas velocidades de filtração.

THOMAS et al. (2001) estudaram o perfil de penetração de partículas no interior de filtros de fibra de vidro (filtros HEPA). Os autores verificaram que houve um decréscimo exponencial das partículas no interior do meio filtrante, sendo que, a camada mais superficial reteve 40 a 70% de partículas. A maior penetração foi obtida, conforme esperado, nos ensaios com maior tempo de duração, sob a mesma concentração de entrada de pó.

REMBOR e KASPER (1996) concluíram a partir de experimentos em que se variou o diâmetro de partículas, que partículas de menor diâmetro penetram mais intensamente no meio filtrante. Da mesma forma, muitos autores concordam que a penetração de partículas no interior do meio filtrante é menos intensa quando se trabalha com maiores diâmetros, sob condições experimentais semelhantes (DAVIS e KIM, 1999; THOMAS et al., 2001; LISOWSKI et al. 2001).

Os efeitos da velocidade de filtração sobre a penetração das partículas foram avaliados por MARTINS (2001), que realizou um estudo onde foi possível verificar que, para velocidades de filtração de 10 cm/s, houve maior retenção de partículas no meio filtrante, bem como maior profundidade de penetração e perda de carga residual, quando em comparação com ensaios realizados com velocidades de filtração de 5 cm/s.

O trabalho de STÖCKLMAYER e HÖFLINGER (1998b) sobre a simulação da regeneração de meios filtrantes, afirmou que nas primeiras filtrações a torta é construída predominantemente na superfície do tecido, sendo quase totalmente removida nas primeiras limpezas. Com o decorrer das filtrações, no entanto, os autores afirmaram que a torta começa a se formar cada vez mais profundamente no interior do tecido, o que resulta em uma maior massa retida. Os autores descreveram este processo como a

construção de uma segunda torta compressível dentro do meio filtrante, e atribuíram essa formação à compressibilidade do material pulverulento. Este fato, de acordo com os autores, explicaria o porque a perda de carga aumenta mais com pós compressíveis, sendo que a torta destes materiais comprime a si mesma e cada vez mais partículas se depositariam nas camadas internas do filtro, não podendo ser daí removidas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Com o intuito de se cumprir os objetivos a que se dispõe este trabalho, apresenta-se a seguir a descrição das etapas realizadas para obtenção dos resultados e a metodologia empregada.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL

Os ensaios pertinentes a este trabalho foram realizados no Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, bem como as análises de caracterização do material pulverulento. As microfotografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram obtidas no CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais)– UFSCar.

A estratégia de investigação foi dividida em duas fases. Inicialmente, foram realizados experimentos preliminares com o objetivo de ponderar a possibilidade de utilização dos filtros adquiridos nos experimentos, bem como avaliar o comportamento dos mesmos durante a filtração. Como amostras de tecidos trançados, utilizou-se o algodão, o poliéster trançado e o Nylon. No entanto, durante esta etapa, estes tecidos apresentaram dificuldades de manuseio e operação, sendo que se optou por analisar apenas os tecidos não trançados (feltros).

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento dos experimentos propriamente ditos, realizados com a finalidade de comparar os tecidos utilizados e discutir o comportamento de cada um nos vários ciclos de filtração. Este trabalho teve como objetivo inicial trabalhar apenas com diferentes materiais filtrantes, totalizando 4 séries de experimentos, com os filtros de polipropileno, poliéster tratado e não tratado e acrílico. No entanto, com o transcorrer da pesquisa, decidiu-se analisar também a profundidade de penetração para materiais com diâmetro e forma diferentes. Desta maneira, totalizou-se oito séries de experimentos.

3.2 MATERIAIS PULVERULENTOS

O material pulverulento inicialmente selecionado para ser utilizado como contaminante foi o concentrado fosfático de Patos de Minas (MG), fornecido pela FOSFÉRTIL S.A.

Como foi adquirido em estado bruto (pó grosseiro), o material foi submetido a peneiramento a úmido em peneira de 400 mesh. O material passante por essa peneira foi deixado em descanso para sedimentar por aproximadamente quatro horas, período após o qual foi depositado em fôrmas de alumínio para nova sedimentação. Posteriormente, quando o excesso de água era removido, estas fôrmas eram postas em estufa para secagem. Em seguida, os pedaços da torta seca formada eram moídos em moinho de bolas por quatro horas, para a desintegração dos blocos e adicional diminuição do tamanho das partículas. Esta etapa foi seguida por um novo peneiramento, agora em peneira de 48 mesh, apenas para desaglomerar as partículas. A rocha de maior granulometria não passou pelo processo de moagem, apenas ao peneiramento a úmido, sendo, porém, obtido a partir de um material de outro lote.

Além deste material, com o objetivo de se obter estudos comparativos, utilizou-se também o polvilho doce, da YOKI, e a mesma rocha fosfática, obtida da mesma forma que a anterior, porém sem passar pelo moinho, obtendo-se um pó de maior diâmetro.

Estes materiais foram então, submetidos às análises de caracterização que seguem.

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PULVERULENTOS

A densidade das partículas foi determinada por picnometria a Hélio, através do equipamento AccuPyc 1330, da Micromeritics, sendo o valor da massa específica obtido pela média de três análises.

O diâmetro médio volumétrico de partículas foi determinado pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus, onde foi realizada a média de cinco medidas. O diâmetro aerodinâmico das amostras foi determinado através do equipamento designado Aerodynamic Particle Sizer (APS) 3320, da TSI, pelo valor médio de duas análises. O

diâmetro de Stokes foi determinado no DEMA-UFSCar, no equipamento CAPA 700 - Particle Sizer Distribution Analyser – HORIBA, pela média de três análises.

Os valores das dimensões de cada material utilizado estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características dos materiais pulverulentos utilizados.

Caracterização	Material		
	Rocha Fina	Rocha Grossa	Polvilho Doce
Massa Específica (10^3 kg/m^3)	2,79	3,07	1,48
Diâmetro Médio Volumétrico (μm)	4,55	31,97	*
Diâmetro de Stokes (μm)	3,71	14,67	8,67
Diâmetro Aerodinâmico (μm)	4,13	27,26	9,68
Esfericidade	0,73	0,74	0,94

*não foi possível determinar: material solúvel em água.

O diâmetro de Stokes representa o diâmetro equivalente de uma esfera com a mesma densidade da partícula e mesma velocidade de sedimentação. O diâmetro aerodinâmico, por sua vez, pode ser definido como o diâmetro de uma esfera com densidade unitária (1 g/cm^3) com a mesma velocidade de sedimentação que a partícula. A relação entre estes dois diâmetros pode ser expressa pela equação 3.1 (HINDS, 1999):

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

em que ρ_0 é a densidade padrão de 1 g/cm^3 , ρ_p é a densidade da partícula, g é a aceleração da gravidade, d_a é o diâmetro aerodinâmico, d_{st} é o diâmetro de Stokes e μ a viscosidade. Neste trabalho, o diâmetro de Stokes calculado pelo diâmetro aerodinâmico obtido experimentalmente apresenta valores diferentes dos valores de Stokes experimentais, pois os métodos de determinação experimental são diferentes.

O diâmetro médio volumétrico pode ser entendido como sendo o diâmetro de uma esfera com volume e densidade equivalentes ao da partícula.

A microscopia de cada material pulverulento utilizado pode ser observada pela Figura 3.1.

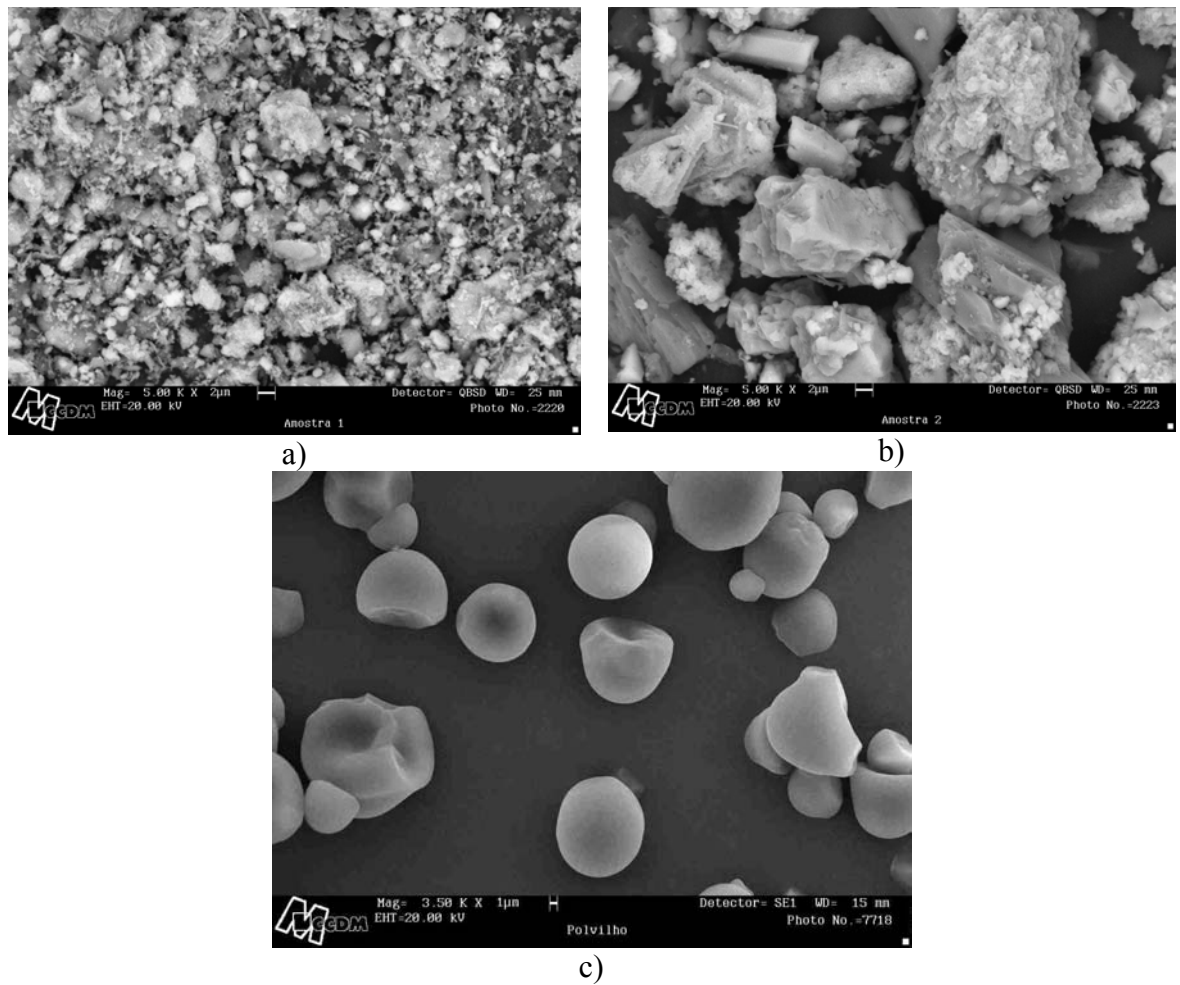


Figura 3.1: Microfotografias dos materiais pulverulentos utilizados. a) Rocha fina, aumento de 5000X; b) Rocha grossa, aumento de 5000X; c) polvilho, aumento de 3500x

A diferença da distribuição granulométrica dos materiais pulverulentos utilizadas nesta pesquisa pode ser verificada através da Figura 3.2.

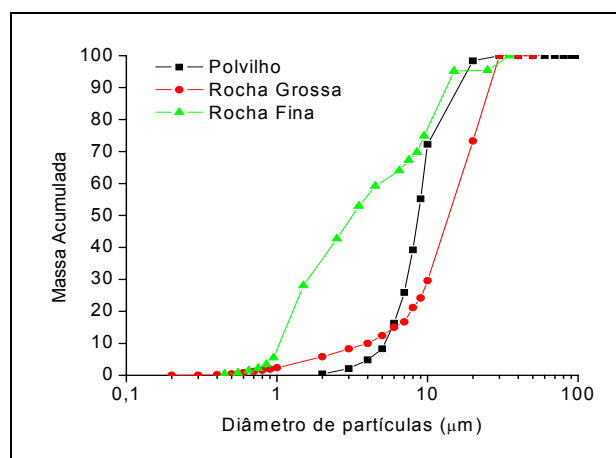


Figura 3.2: Distribuição granulométrica dos materiais utilizados.

3.3 MEIOS FILTRANTES

Os meios filtrantes utilizados neste trabalho foram adquiridos através de doação, pela empresa Gino Cacciari, com sede em São Paulo, SP.

As características destes meios são descritas pela Tabela 3.2 que apresenta os dados fornecidos pelo fabricante, responsável pelo tratamento dos mesmos.

Tabela 3.2: Descrição dos meios 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
Poliéster 100% sem tratamento	1016P	Feltro Agulhado	550	NC
Acrílico 100%	7002AC	Feltro Agulhado	550	2,5
Algodão	2032A	Granite	720	1,6
Poliéster Trançado	1082P	Sarja	510-520	0,9

Os tratamentos realizados nos feltros foram a calandragem e a chamuscagem em uma face, com exceção, obviamente, do poliéster sem tratamento. O algodão, por sua vez, foi utilizado cru, enquanto que o poliéster trançado foi termofixado. Os meios filtrantes foram cortados em seções circulares de 18 cm de diâmetro, resultando em uma área filtrante igual a 254,47 cm².

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES

Além das características fornecidas pelo fabricante, foram realizados alguns ensaios de caracterização, a fim de se obter uma melhor avaliação dos resultados, uma vez que este trabalho se destina a um estudo comparativo. Para tal levantamento, foram realizados os ensaios que seguem.

Determinação de Diâmetro de Fibras

Verificado por meio de microscopia óptica e posterior análise no analisador de imagens Image Pro Plus, após o tratamento descrito no Anexo A;

Determinação de Porosidade dos Filtros Limpos

Determinada experimentalmente por porosimetria a mercúrio, no porosímetro Pore Master; calculada teoricamente pela aplicação da equação de Ergun (2.23) e determinada pela técnica desenvolvida por Aguiar e Coury (1996), para determinação óptica da porosidade de tortas de filtração, a partir das imagens do microscópio ótico. Esta última determinação consistiu em se medir a área ocupada pelas fibras e a área total. A porosidade superficial era dada então pela Equação (3.2):

$$\varepsilon_{siperficial} = \frac{\text{Área total} - \text{Área das fibras}}{\text{Área total}} \quad (3.2)$$

Um exemplo das imagens está apresentado na Figura 3.3.

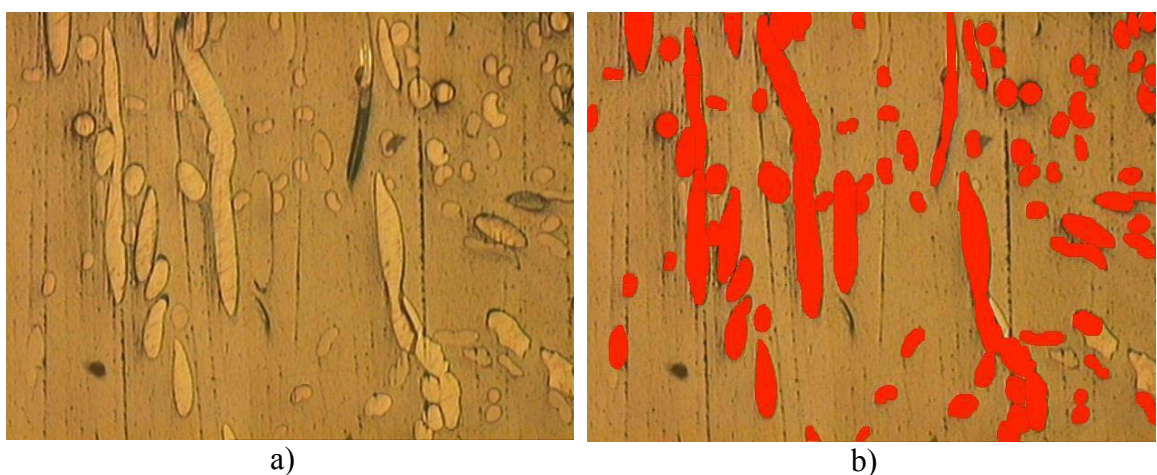


Figura 3.3: Exemplo de determinação da porosidade superficial via microscópio óptico: a) imagem original; b) imagem tratada para a determinação da área.

Esta determinação foi realizada para várias sessões transversais, desde a superfície do tecido até a face oposta, de modo a contabilizar toda a profundidade do tecido e suas variações, incluindo a do tecido trançado presente no interior dos tecidos, que interfere no valor da porosidade total.

Permeabilidade dos Filtros Limpos

A permeabilidade foi obtida experimentalmente, variando-se a velocidade superficial através do elemento filtrante e determinando-se a perda de carga resultante. Com estes dados construíram-se as curvas de perda de carga em função da velocidade superficial, para cada tecido, baseadas na equação (2.9). As curvas com os resultados estão apresentadas no ANEXO B.

3.4 EQUIPAMENTO DE FILTRAÇÃO E COLETA DE DADOS

3.4.1 EQUIPAMENTO DE FILTRAÇÃO

O equipamento de filtração em que foram coletados os dados deste trabalho pertence ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. O mesmo é constituído por um sistema de filtração propriamente dito, um alimentador de pó, um transdutor e um soprador, que estão apresentados na Figura 3.4.

O ar comprimido utilizado era proveniente da linha do departamento e antes de entrar no sistema de filtração passava previamente através de dois desumidificadores contendo sílica. Esta operação era necessária para remover a umidade do ar e mantê-la entre 8 e 13%.

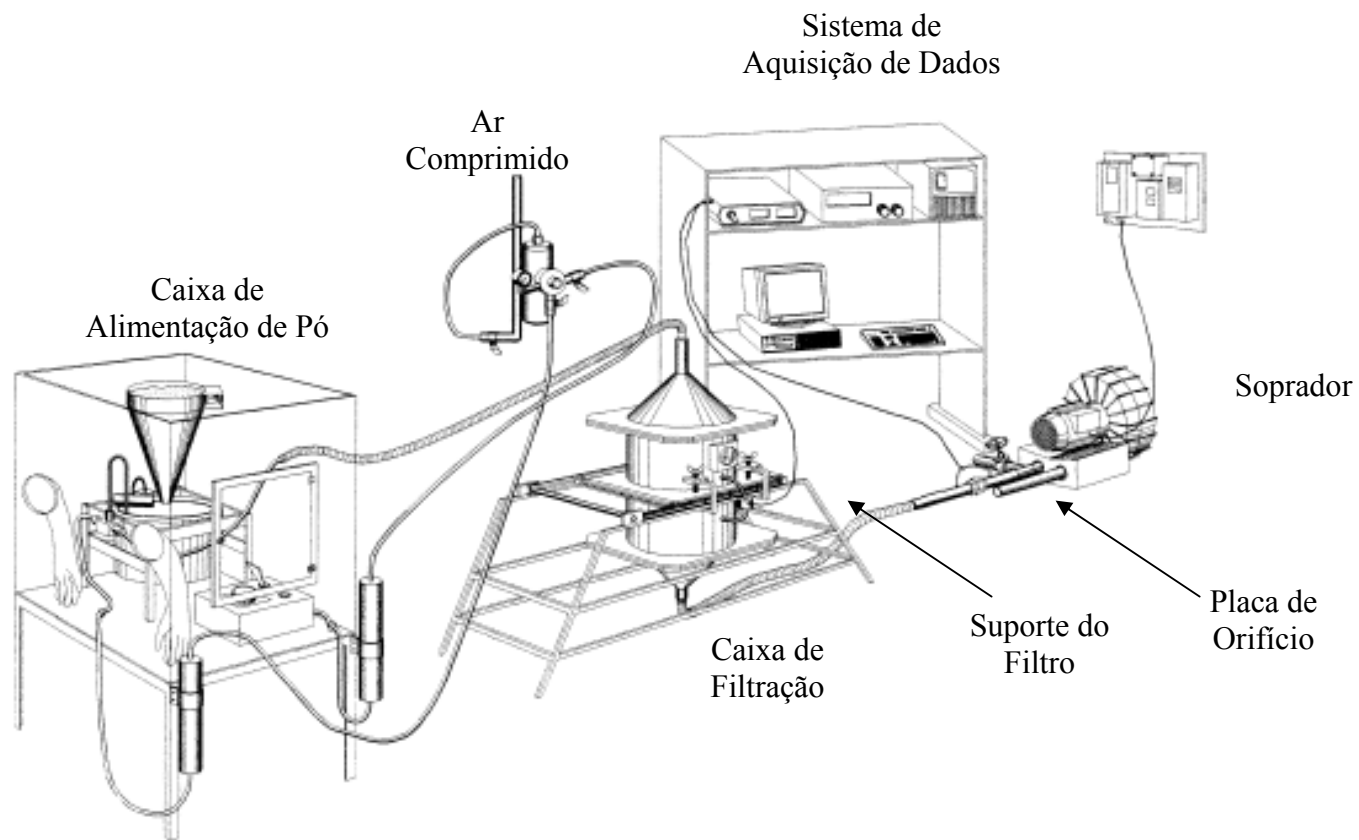


Figura 3.4: Esquema geral do equipamento de filtração e limpeza.

3.4.2 ALIMENTAÇÃO DE PÓ

O alimentador de pó foi construído utilizando um disco giratório com um sulco circular, sobre o qual foi adaptado um cone por onde era alimentado o pó. Um motor alocado junto ao cone promovia vibrações que auxiliavam o preenchimento eficiente do sulco.

Para assegurar maior homogeneidade na alimentação, adaptou-se um nivelador de metal em forma de anel, encaixado na saída do cone de alimentação.

A velocidade de rotação foi ajustada através de um controlador, expresso em porcentagem (%) da velocidade máxima. Mas ainda assim, antes de cada experimento era realizada uma calibração de forma a garantir uma rotação de 0,56 rpm do prato, ou seja, o prato completava uma rotação a cada 1 minuto e 47 segundos. As partículas entravam na corrente gasosa com o auxílio de um venturi, cuja saída de baixa pressão era colocada acima do sulco preenchido, sugando, assim, o pó para a corrente de ar. O ar comprimido fornecido ao venturi era proveniente da linha e atravessava a coluna de desumidificação. O detalhamento deste sistema está apresentado na Figura 3.5. Todo este conjunto foi isolado em uma caixa de acrílico, bem vedada, de modo que a umidade da corrente gasosa fosse adequadamente controlada.

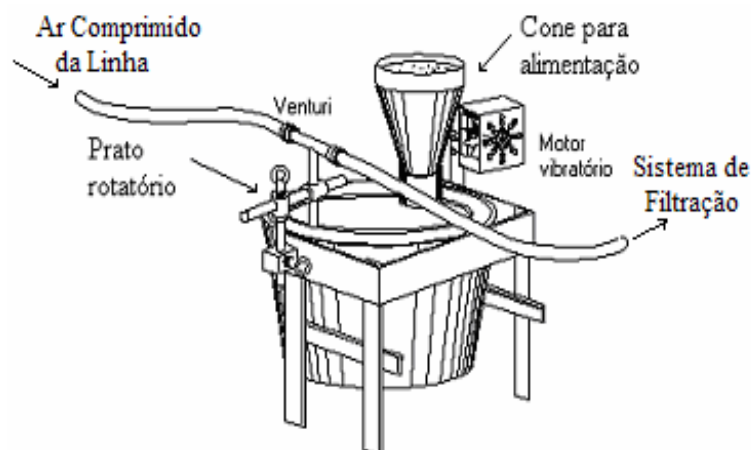


Figura 3.5: Detalhamento do sistema de alimentação de pó.

O tecido a ser estudado era afixado entre dois moldes de aço inoxidável que eram encaixados entre duas tampas cônicas de PVC, uma superior, ligada ao alimentador de pó através de uma mangueira de 2 cm de diâmetro, por onde era realizada a alimentação da corrente gasosa contaminada, e outra inferior, conectada ao soprador. Este módulo era móvel permitindo que, durante a operação de filtração, o filtro fosse mantido na posição horizontal, e na limpeza o filtro era virado e mantido na vertical. O detalhamento deste sistema está apresentado na Figura 3.6.

Acima e abaixo do filtro foi conectado um sensor de pressão conectado a um micromanômetro, para a determinação da perda de carga no filtro. Assim, a placa de aquisição de dados armazenava os valores de perda de carga on-line.

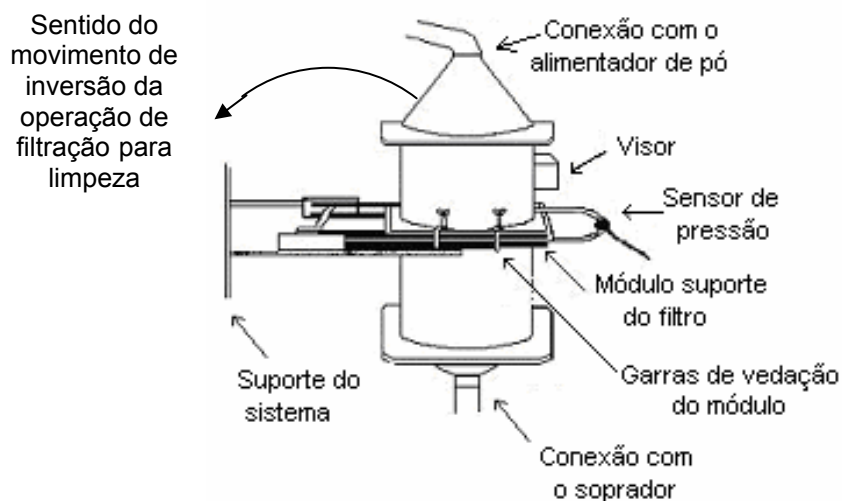


Figura 3.6: Esquema da caixa de filtração e limpeza.

Este movimento da mudança do modo filtrando para o modo limpando pode ser melhor observado pelas fotos das Figuras 3.7 e 3.8.



Figura 3.7: Equipamento no modo filtrando.



Figura 3.8: Equipamento no modo limpando.

3.4.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

Todos os experimentos foram monitorados por um sistema de aquisição de dados on-line, que permitia a análise de parâmetros como a perda de carga no filtro, a velocidade de filtração e limpeza e o tempo de operação transcorrido.

O hardware utilizado era composto por uma placa de aquisição de dados comercial para microcomputadores compatíveis com o padrão IBM-PC e permitiu a leitura de 16 sinais de sensores externos e controle de dois atuadores analógicos e 24 linhas de entrada-saída digitais (tipo liga-desliga).

O software foi elaborado em Visual Basic 3.0, que juntamente com as rotinas fornecidas pelo fabricante da placa, controlava o experimento e realizava o registro das variáveis de interesse.

A velocidade do ar durante toda a filtração e toda a limpeza era mantida constante, em um valor previamente estipulado no programa, com o auxílio do controlador, que atuava na rotação de um soprador, acionado por um motor assíncrono trifásico de 7,5 HP.

Durante a filtração o soprador funcionava como sugador, pela inversão da sua rotação. Nesta fase, o aumento da perda de carga provocado pelo depósito de partículas no tecido tendia a diminuir a vazão de ar que atravessa o meio filtrante, assim, o controlador operava de forma a aumentar a rotação e manter a velocidade constante. O sensor de pressão de uma placa de orifício, situada na saída do filtro e antes do soprador, realizava a medida de perda de carga e o software reconhecia a velocidade, que por sua vez era comparada com a velocidade estipulada, gerando um sinal de erro, que era tratado pelo controlador tipo proporcional + integral + derivativo na forma digital. O sinal de atuação era enviado ao inversor de frequência (via saída analógica) para correção da velocidade.

Com este aparato foi possível obter dados confiáveis de variação da perda de carga em função do tempo para a velocidade estipulada, bem como minimizar erros operacionais nos processos de filtração e limpeza do tecido.

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.5.1 ENSAIOS GERAIS – COMPARAÇÃO ENTRE OS TECIDOS

Para cada tecido utilizado, foram coletados dados de perda de carga em função do tempo para dez ciclos de filtração e limpeza. A velocidade de filtração foi estipulada em 10 cm/s, dentro da faixa utilizada industrialmente, e de limpeza em 12 cm/s. O método de limpeza empregado nos experimentos foi o fluxo de ar reverso, durante um período de dois minutos, através da inversão do sentido da corrente de ar, e foi o método selecionado por permitir uma maior reprodutibilidade dos resultados.

A perda de carga máxima admitida em cada ciclo foi estabelecida em 100 mmH₂O, por ser este um valor usualmente aplicado na indústria. Desta forma, pôde-se verificar a diminuição do tempo de cada ciclo provocada pela perda de carga residual.

A massa do filtro limpo era obtida por pesagem em uma balança Marte modelo AM5500, de dois dígitos. Após cada filtração o conjunto filtro-torta era novamente pesado para obter-se a massa de pó depositada. Considerando-se que a alimentação do sistema era constante, obtinha-se o valor da carga mássica aplicada no filtro.

Após a recolocação do filtro no sistema, a posição da caixa de filtração era fixada na horizontal (portanto o filtro ficava na vertical) e a tampa de PVC superior era removida. Por meio da interface do software, fixava-se o modo “limpeza” e estabelecia-se a velocidade de limpeza desejada. A massa de pó removida nesta operação era coletada e pesada, assim como a massa do filtro após a limpeza. Este procedimento era realizado para cada um dos ciclos.

A cada ensaio foi dada a seguinte designação: ao tecido submetido a uma filtração e uma limpeza apenas, denominou-se Ensaio 01. Para o ensaio em que o tecido foi submetido a duas filtrações e suas respectivas limpezas, denominou-se Ensaio 02, e assim sucessivamente, até o Ensaio 10, no qual foram realizadas dez filtrações e dez limpezas. A Tabela 3.3 apresenta a denominação dos ensaios.

Tabela 3.3: Designação dos ensaios realizados.

Ensaio	Número de ciclos realizados									
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
01										
02										
03										
04										
05										
06										
07										
08										
09										
10										

Os tecidos obtidos após a limpeza foram tratados através do procedimento desenvolvido por AGUIAR (1995) para a preparação das partes dos tecidos para serem analisados no MEV, constituído pelas etapas de pré-endurecimento do tecido, de embutimento, de seccionamento, de esmerilamento e de polimento. Estas etapas estão descritas no ANEXO A. As partes analisadas foram retiradas preferencialmente das mesmas regiões do filtro. Uma ilustração do local aproximado de onde eram retiradas as amostras é apresentada na Figura 3.9, sendo cada uma cortada em quadrados de cerca de 1 cm de lado. A Figura 3.10 apresenta o aspecto da limpeza aos pedaços, em uma amostra após o endurecimento, para melhor visualização.

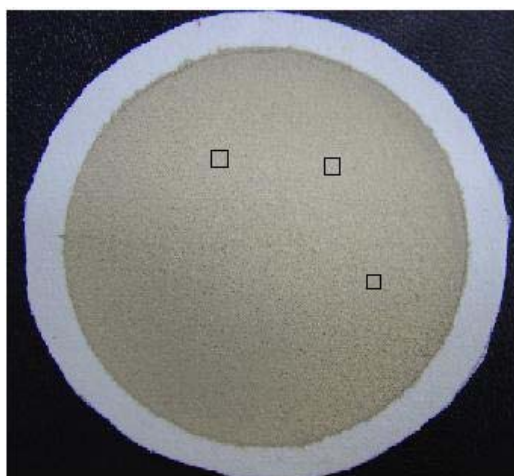


Figura 3.9: Partes da torta removidas para análise em MEV ou microscopia ótica.

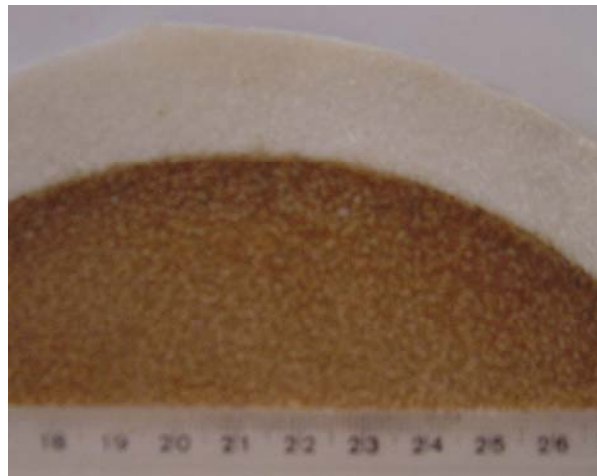


Figura 3.10: Aspecto da limpeza aos pedaços em uma amostra de tecido já endurecida.

A profundidade de deposição das partículas no interior do meio filtrante foi medida para pelo menos duas das quatro partes do filtro. Em cada amostra escolheram-se duas colunas, ou duas faixas, sendo preferencialmente uma onde houve remoção de torta e outra onde não houve, totalizando quatro perfis transversais analisados. Estes perfis foram fotografados, tirando-se dez microfotografias seqüenciais do comprimento de cada coluna, da superfície torta-ar até aproximadamente 1,0 mm de profundidade, com aumento de 2000X. Adotou-se esta profundidade limite, pois a partir deste ponto não se observava mais nenhuma partícula, sendo que a análise de toda a profundidade do tecido tornaria o processo oneroso e demasiado lento. A Figura 3.11 apresenta uma ilustração deste processo, envolvendo as cinco primeiras fotos.

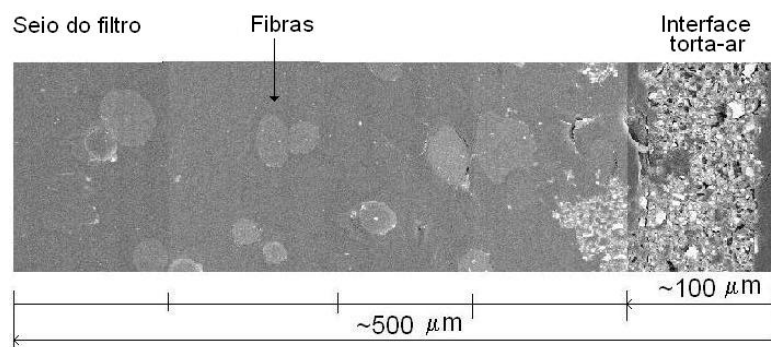


Figura 3.11: Esquema de cinco fotos tiradas do interior do meio filtrante, em seqüência, para determinação da profundidade de penetração, com aumento de 2000X.

As imagens obtidas no MEV foram, então, processadas em um analisador de imagens, Image Pro-Plus, versão 3.0. O processamento era realizado binarizando-se as imagens a fim de se obter um melhor contraste entre as partículas e o restante da amostra, facilitando e proporcionando maior confiança na contagem e na determinação do diâmetro, realizada automaticamente pelo software.

Este processo possibilitou observar ainda se a limpeza ocorre de forma heterogênea no interior do tecido, como ocorre na superfície e ainda verificar a distribuição granulométrica das partículas no interior do mesmo. A Figura 3.12 ilustra a microfotografia original e a binarizada pelo software.

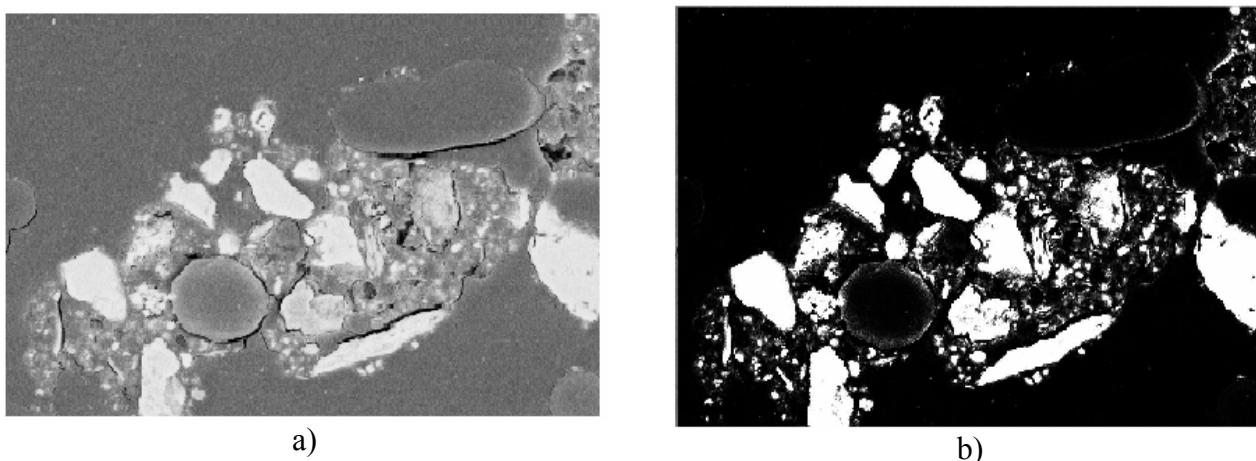


Figura 3.12: Comparação entre a microfotografia da foto original (a) e a binarizada pelo software (b).

Desta forma foi possível obter os dados de profundidade de penetração, o número de partículas em cada faixa fotografada e a distribuição granulométrica de cada material.

3.5.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MATERIAIS PULVERULENTOS

Foram realizados experimentos visando avaliar a performance dos ciclos de filtração com materiais pulverulentos com características diferentes. Utilizou-se para essa finalidade a rocha fosfática grossa e o polvilho doce em ensaios com as mesmas condições experimentais descritas anteriormente.

Para comparação das duas variedades de rocha fosfática, foram realizados experimentos apenas para os ciclos 1, 5 e 10, com o acrílico, uma vez que se verificou

que a profundidade de penetração não variou com o número de ciclos. O acrílico foi selecionado por apresentar melhores condições de limpeza e alcançar a estabilidade mais rapidamente. Para este material as análises de profundidade de penetração também foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura.

As análises em que se utilizou o polvilho doce foram realizadas para os ciclos 1, 3, 5 e 10, em poliéster tratado e em poliéster não tratado, para comparação destes dois tecidos em ensaios com a rocha fosfática fina. No caso do polvilho doce, por se tratar de um material orgânico, e de difícil observação em MEV, as análises de profundidade de penetração foram realizadas em um microscópio ótico, da marca OLYMPUS Bx60. Como se trata também de um material de granulometria aproximadamente homogênea, a análise da variação de diâmetro de partículas no interior do meio filtrante não foi realizada.

Aplicando-se a metodologia aqui descrita e com o auxílio destas ferramentas, deu-se início à parte experimental.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo segue a apresentação dos resultados obtidos, envolvendo primeiramente os resultados preliminares realizados com todos os tecidos adquiridos. Concomitantemente, segue-se a discussão destes resultados.

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Com o intuito de se fazer uma observação mais minuciosa da superfície dos tecidos, obteve-se microfotografias dos mesmos. As imagens obtidas estão apresentadas na Figura 4.1. Por meio destas microfotografias, pôde-se verificar que o tecido de polipropileno apresentou uma estrutura superficial mais fechada que os demais feltros analisados, por causa do maior número de pontos quentes (hot spots), resultantes dos processos de calandragem e chamuscagem. Esta característica ocorreu porque as fibras da superfície são fundidas pelo calor do tratamento, resultando em pontos fechados na superfície do tecido. Com relação aos tecidos trançados, o Nylon apresentou fibras mais homogêneas, sem pespontados, quando comparado aos outros filtros, enquanto o algodão exibiu uma superfície menos uniforme.

Em seguida, realizou-se uma série de testes preliminares, visando averiguar o comportamento destes meios filtrantes durante a filtração. Como material particulado, utilizou-se a rocha fosfática de diâmetro médio volumétrico igual a 4,55 μm , denominada rocha fina.

As filtrações foram realizadas aplicando-se uma velocidade de filtração de 10 cm/s, sendo que a perda de carga máxima não foi estipulada. Como o objetivo dos ensaios era apenas observar o comportamento dos filtros com o decorrer do processo de filtração, cada ensaio era realizado até haver alguma alteração no comportamento das curvas, ou até cerca de 600 mmH₂O. Os resultados obtidos estão apresentados pela Figura 4.2.

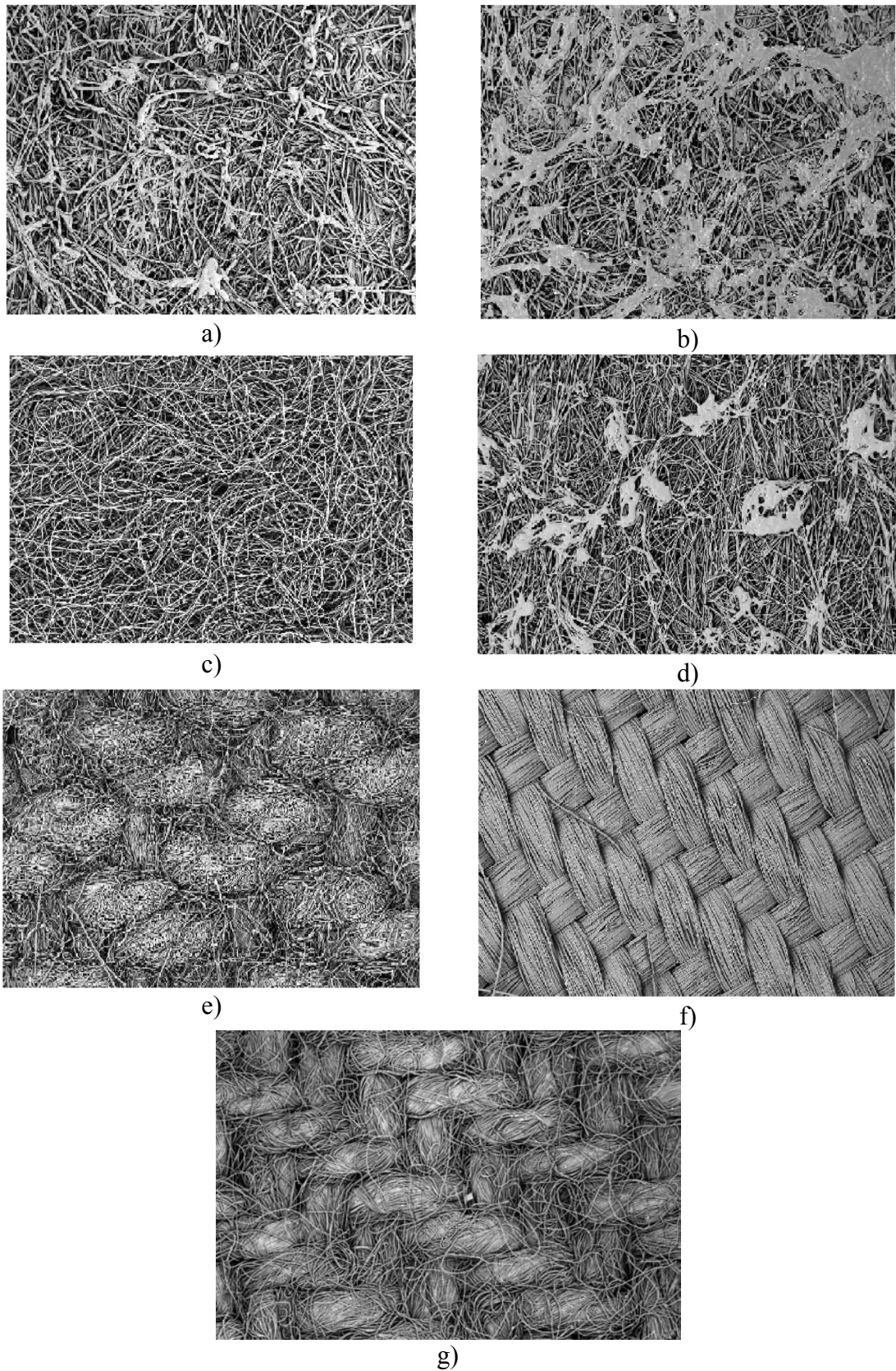


Figura 4.1: Microscopia eletrônica de varredura dos tecidos testados. Aumento de 50X: a) Acrílico; b) Polipropileno; c) Poliéster não tratado; d) Poliéster tratado, e) Algodão; f) Nylon; g) Poliéster trançado.

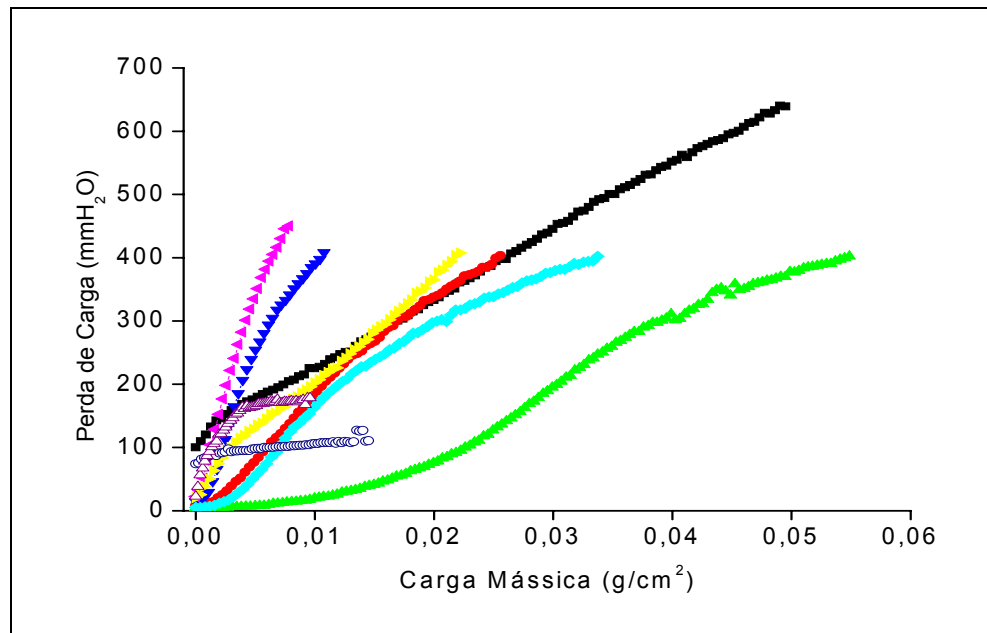


Figura 4.2: Ensaio preliminares nos tecidos. (!) Algodão com o-ring; (.) Poliéster tratado; (7) Poliéster não tratado; (B) Polipropileno; (A) Acrílico; (Ω) Nylon com O-ring; (β) Poliéster trançado com O-ring; (-) Algodão com rede; (8) Nylon com rede e O-ring.

Os tecidos trançados confeccionados com algodão, poliéster e Nylon apresentaram dificuldades de manuseio devido à sua baixa espessura e elevada flexibilidade. No caso do Nylon, o tecido chegava a escapar do módulo com o aumento da perda de carga. O algodão, que por sua vez era mais espesso, também apresentou dificuldade semelhante, sendo que a filtração provocava uma grande deformação no tecido, que tomava a forma de uma semi-esfera. Devido a isso houve dificuldades em se remover o módulo que continha o tecido do sistema para as pesagens necessárias, havendo desestruturação da torta, pois o fundo do tecido encostava-se no suporte do módulo.

Buscando solucionar estes problemas, adaptou-se uma rede de arame ao módulo, com o objetivo de impedir o escape do tecido, bem como de sua deformação (formação da concavidade) com o aumento da pressão de filtração. Esta rede era feita de uma malha de aço semelhante a uma peneira, a exemplo das gaiolas utilizadas nos filtros de manga industriais. Por possuir uma abertura razoavelmente grande, considerou-se que este dispositivo não interferiria no valor da perda de carga registrada. Posteriormente, adaptou-se uma espécie de O-ring achatado, de mesmo diâmetro do filtro, simulando uma maior espessura e garantindo a vedação do sistema.

Os ensaios apresentados na Figura 4.2 foram realizados, para todos os tecidos trançados, com o O-ring preso ao módulo, exceto o ensaio “algodão com rede”, pois o conjunto ficou demasiado espesso, dificultando a colocação do módulo no sistema de filtração.

A análise das curvas evidencia as três fases da filtração, como foi apresentado no Capítulo 2. No caso dos tecidos não trançados, particularmente o poliéster não tratado, a primeira fase, ou estágio de filtração interna, onde há a captura de partículas pelas fibras do tecido, foi mais visível que nos demais tecidos. Para os outros tecidos não trançados as três fases são também visíveis no primeiro ciclo, mas menos evidentes. Para o polipropileno, por exemplo, a fase inicial é muito menor que para os feltros.

Com o decorrer das filtrações, após a formação da torta, caracterizada pela parte linear da curva de filtração, ocorreu uma alteração deste padrão linear de comportamento nos feltros. Nos casos aqui estudados, ocorreu uma diminuição da taxa de aumento da perda de carga em função da massa coletada no filtro, ou seja, a massa depositada passou a provocar um menor aumento na perda de carga. Este comportamento não é ainda um fenômeno completamente compreendido, sendo muitas vezes atribuído a uma reestruturação do tecido ou da torta, ou ainda, ao rompimento de algumas fibras, quando submetidas a valores maiores de perda de carga. Nestas condições haveria maior abertura para a passagem do ar. No caso dos experimentos realizados nesta pesquisa, este rompimento não foi observado.

SILVA et al. (1999b) atribuíram este comportamento a um aumento da porosidade da torta que ocorria da interface torta-filtro para a interface torta-ar, observado em seus experimentos, e a uma diminuição da resistência específica da mesma. DENNIS e KLEM (1982) sugerem que este comportamento pode estar associado ao colapso dos poros da torta, e resultaria em um aumento da penetração de partículas no tecido. Porém, este comportamento não está ainda claramente compreendido.

A partir das curvas da Figura 4.2, limitou-se a perda de carga em 200 mmH₂O, para se ter uma melhor visualização das curvas, mostrada na Figura 4.3, que nada mais é que uma ampliação do gráfico da Figura 4.2. Por esta Figura verifica-se mais facilmente o comportamento distinto entre as curvas, quando submetidas às mesmas condições. A

perda de carga inicial é marcadamente diferente, sendo superior para o tecido de algodão e menor para os demais tecidos estudados.

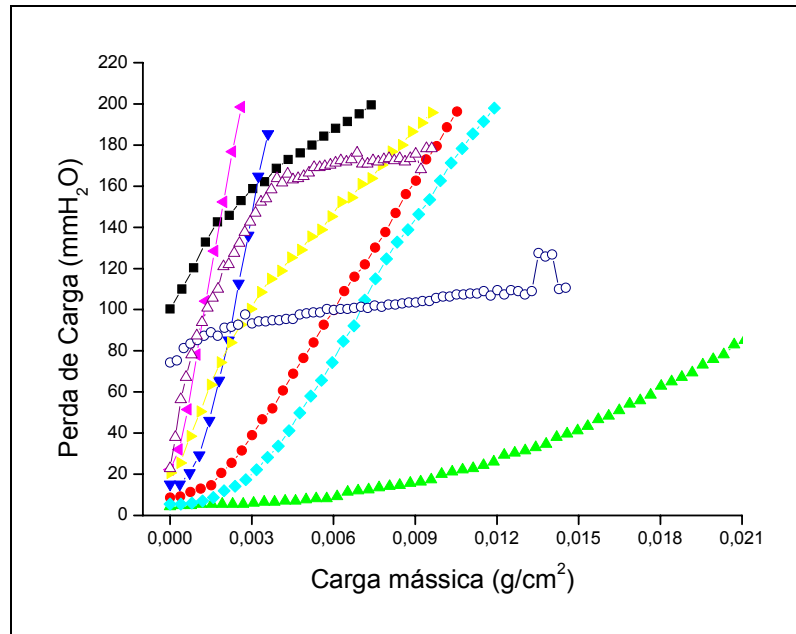


Figura 4.3: Ampliação das curvas de filtração dos ensaios preliminares. (!) Algodão com o-ring; (·) Poliéster tratado; (7) Poliéster não tratado; (B) Polipropileno; (A) Acrílico; (⊖) Nylon com O-ring; (β) Poliéster trançado com O-ring; (-) Algodão com rede; (8) Nylon com rede e O-ring

As curvas do algodão e do poliéster trançado apresentaram a concavidade correspondente à fase de transição oposta aos demais tecidos. Este comportamento não pode ser expandido para todos os tecidos trançados, uma vez que o Nylon apresentou comportamento semelhante aos demais feltros. No entanto, DENNIS e KLEMM (1982) que descreveram a filtração em termos de perda de carga pela velocidade ($\Delta P/V$), conhecido por arraste, em função da carga mássica, para diferentes tecidos trançados, verificaram que, para o caso de tecidos trançados multifilamentosos, com pespontados e vazios entre os fios, houve um preenchimento destes vazios e depressões antes da formação da torta, com elevado aumento da perda de carga no início da filtração.

As microfotografias de superfície realizadas neste trabalho, para os tecidos de algodão e poliéster trançado comprovam a existência de pespontados nos fios formados. Mas, isso não ocorre no Nylon, ratificando os resultados de DENNIS e KLEMM (1982). No entanto, o Nylon apresentou a maior taxa de aumento de perda de carga em função da carga mássica estudada, o que pode indicar uma menor permeabilidade.

O poliéster sem tratamento, por sua vez, apresentou o maior período de filtração interna. Se por um lado, esta constatação indica a eficiência do tratamento superficial recebido em minimizar a penetração de partículas no interior do meio filtrante, por outro lado, ressalta o aumento da perda de carga inicial produzida por este tratamento nos demais tecidos, tornando o ciclo mais curto. Pode ser, ainda, que esteja ocorrendo o transpasse de partículas pelo meio filtrante, ou seja, a penetração de partículas através do filtro sem tratamento, ocasionando uma baixa eficiência. No entanto, este fato não foi investigado, uma vez que neste trabalho não se determinou a eficiência dos meios filtrantes. A informação relativa à maior penetração de partículas no interior do meio filtrante será investigada posteriormente, pelas análises microscópica interna dos tecidos.

Nos ensaios com tecidos trançados com a adaptação da rede de arame ao módulo, sob o tecido, foi possível verificar que a perda de carga aumentava inicialmente com uma taxa muito menor que aquela dos ensaios sem a rede e com O-ring, permanecendo praticamente constante após algum tempo de filtração, como ilustra as Figuras 4.2. e 4.3.

Esta diferença de comportamento pode ser provocada pelo fechamento dos poros da superfície do tecido com o aumento da perda de carga, nos ensaios sem rede, produzidos pela deformação dos tecidos, comprimindo as fibras superficiais e a torta já formada.

A presença da rede forçou o tecido a manter sua forma plana, com os poros abertos, mantendo uma grande permeabilidade ao ar, que pode ser o motivo pelo qual a perda de carga apresentava pouca alteração no decorrer da filtração. Provavelmente, a torta formada sob estas condições seja diferente daquela em que a filtração foi realizada sem a rede, o que pode ser confirmado pelos valores da resistência específica da torta, apresentados posteriormente na Tabela 4.1.

Outro fato interessante observado na Figura 4.3 foi que, nos ensaios com a rede, a concavidade para estes dois tecidos trançados foi semelhante, ao contrário do que foi apresentado nos ensaios apenas com o O-ring, quando o Nylon apresentou uma curva praticamente linear.

No entanto, comparando-se os ensaios com e sem rede para os dois tecidos testados, verifica-se que a distensão e conseqüente deformação dos filtros colaboram em

grande parte para o aumento da perda de carga da filtração já que, com a rede, a taxa de aumento de perda de carga foi significativamente menor.

Para avaliar a resistência específica da torta formada em cada tecido, determinou-se o K_2 experimental para as curvas da Figura 4.3 de acordo com a equação 2.17. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Determinação da resistência específica das tortas de filtração dos ensaios preliminares.

Tecido	Resistência específica da torta (s^{-1})
Algodão (fase 1)	$2,4 \cdot 10^{-6}$
Algodão (fase 2)	$9,7 \cdot 10^{-4}$
Poliéster Tratado	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Poliéster não tratado	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Polipropileno	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Acrílico	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Nylon com O-ring	$7,3 \cdot 10^{-5}$
Poliéster trançado	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Nylon com a rede (fase 1)	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Nylon com a rede (fase 2)	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Algodão com a rede (fase 1)	Fase não linear – não determinada
Algodão com a rede (fase 2)	$1,5 \cdot 10^{-4}$

No caso do algodão com O-ring, do algodão com rede e do Nylon com rede e O-ring, calculou-se a permeabilidade para a primeira fase linear (aqui chamada fase 1) e para a segunda (chamada fase 2).

A diferença apresentada no coeficiente angular da primeira parte linear das curvas (antes da deformação), correspondente à filtração pela torta, e confirmada pelos valores apresentados na Tabela 4.1, indica que a estrutura do tecido interfere na torta formada, ao contrário do que afirmaram alguns autores (JAPUNTICH et al., 1994), pelo menos quando se utiliza um tecido limpo. A semelhança deste coeficiente ocorreu apenas em alguns tecidos, sob determinadas condições, como foi entre o poliéster tratado e o acrílico, e entre o polipropileno e o Nylon, que entre 100 e 200 mm H₂O apresentaram resistência específica praticamente iguais, mas depois tiveram comportamento diverso, de modo que não se pode atribuir às características semelhantes da torta.

De posse destes dados, e avaliando-se a dificuldade apresentada por cada tecido, optou-se por trabalhar com quatro deles: o acrílico, o polipropileno e o poliéster,

todos tratados, e o poliéster não tratado, uma vez que os tecidos trançados apresentaram as dificuldades descritas no manuseio dos mesmos, o que poderia conduzir a resultados não reprodutíveis e não confiáveis.

Para possibilitar a comparação entre estes meios filtrantes e se ter maior clareza dos resultados obtidos realizaram-se testes para caracterizar os filtros, que serão apresentados no item a seguir.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS FILTRANTES

Os tecidos selecionados para o desenvolvimento da pesquisa foram o acrílico, o polipropileno e o poliéster, como exemplos de tecidos tratados superficialmente, e o poliéster sem tratamento, como exemplo de tecido não tratado.

Dentre as características passíveis de serem investigadas, o diâmetro linear da fibra, a porosidade, a permeabilidade e a densidade de empacotamento dos meios filtrantes foram as propriedades determinadas para qualificar os tecidos.

Tentou-se determinar a porosidade dos meios filtrantes utilizando o porosímetro a mercúrio. Porém, os resultados obtidos não foram conclusivos, uma vez que as características do meio filtrante inviabilizaram a validade dos resultados, pela própria metodologia de análise. O problema ocorreu porque os poros dos tecidos testados são relativamente grandes, o que permite a entrada de determinada quantidade de mercúrio no meio filtrante antes de se iniciar a pressurização da amostra. Desta forma, a quantidade de mercúrio que penetra na amostra apontada pelo teste é geralmente inferior ao valor real, o que resultou em valores incorretos e não reprodutíveis. Desta forma, a porosidade foi obtida pela equação de Ergun e comparada com a porosidade superficial obtida em microscópio ótico, após o tratamento da amostra.

Os resultados de permeabilidade assim como os de porosidade calculados por Ergun foram obtidos variando-se a velocidade e verificando-se a variação da perda de carga. Os dados destas curvas apresentam-se no ANEXO B Para obtenção da permeabilidade os dados levantados foram ajustados utilizando-se a Equação (2.8). Com estes mesmos dados e considerando os valores de diâmetro de fibras, obtidos via

microscopia ótica, utilizou-se a equação de Ergun (Equação 2.22) para determinar a porosidade teórica. Os valores de viscosidade e de densidade do ar utilizados nos cálculos foram $1,82 \cdot 10^{-5}$ kg/m.s e $1,21$ kg/m³, respectivamente, para uma temperatura de 20 °C. Os resultados da caracterização dos tecidos estão sumarizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Caracterização dos meios filtrantes

Meio filtrante	Polipropileno (PP)	Acrílico (AC)	Poliéster tratado (PT)	Poliéster não tratado (PNT)
*Especificação	3008PP	7002AC	1016P	1016P
*Contextura	Feltro Agulhado	Feltro Agulhado	Feltro Agulhado	Feltro Agulhado
*Gramatura (g/cm ²)	600	550	550	550
*Tratamento	Calandrado/ chamuscado	Calandrado/ chamuscado	Calandrado/ chamuscado	Nenhum
*Espessura nominal (mm)	2,5 – 2,8	2,2	1,9	Não fornecido
***Espessura óptica (mm)	2,5	2,5	2,5	4,0
*Diâmetro nominal de fibras (µm)	21,0	21,0	21,0	21,0
***Diâmetro linear de fibras (µm)	23,6	22,7	19,43	17,75
**Porosidade Ergun	0,78	0,83	0,82	0,87
***Porosidade Superficial	0,72	0,77	0,81	0,88
**Densidade de Empacotamento	0,28	0,23	0,19	0,12
**Permeabilidade ao ar (m ²)	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-8}$	$5,9 \cdot 10^{-8}$	$9,4 \cdot 10^{-8}$

Dados: *fornecidos pelo fabricante; **calculado pelo autor; *** determinado pelo autor por microscópio ótico e análise de imagem.

A densidade de empacotamento apresentada na Tabela 4.2 foi obtida pela equação 2.21.

A semelhança observada nas características do acrílico e do poliéster tratado justificam a paridade dos valores de perda de carga inicial apresentados nos estudos preliminares. Desta forma, como a menor permeabilidade e porosidade resultaram também em uma maior perda de carga inicial, o contrário é válido para o poliéster sem tratamento, cujos maiores valores de permeabilidade e porosidade resultaram em menores valores de perda de carga inicial.

De posse dos dados de caracterização dos meios filtrantes, deu-se início à fase de investigação da filtração propriamente dita, com o levantamento das características

de filtração para cada filtro e de cada material pulverulento, e da relação destas características com a profundidade de penetração de partículas no interior do meio.

Este estudo foi dividido na etapa de apresentação de cada experimento, separadamente, seguido da etapa comparativa entre os experimentos de cada grupo. Os grupos de experimentos foram separados em:

- a. Grupo de avaliação do tecido: experimentos realizados com os quatro tecidos (AC, PP, PT e PNT) e com rocha fina (3,71 μm);
- b. Grupo de avaliação do tratamento do tecido e efeito da forma das partículas: experimentos realizados com o PT e com o PNT, filtrando tanto a rocha fina (3,71 μm) quanto o polvilho doce (8,67 μm);
- c. Grupo de avaliação do diâmetro de partícula: experimentos realizados com as rochas grossa (14,67 μm) e fina (3,71 μm) em acrílico;
- d. Grupo de avaliação do efeito da perda de carga máxima: experimentos realizados em acrílico filtrando rocha grossa (14,67 μm), com perda de carga máxima de 100 mmH₂O e 300 mmH₂O.

4.3 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO ACRÍLICO E ROCHA FINA (3,71 μm)

Os resultados dos ensaios utilizando acrílico estão apresentados na Figura 4.4. Os valores de perda de carga (eixo das ordenadas) foram obtidos diretamente, em cada experimento, através do sistema de aquisição de dados. Os valores de carga mássica (eixo das abscissas) foram calculados para cada ponto coletado, conforme a Equação 4.1.

$$CM = \frac{M_t}{A} \cdot \frac{T_i}{T_t} \quad (4.1)$$

em que: CM é a carga mássica aplicada ao filtro, em gramas por centímetro quadrado, M_t é a massa total de pó depositada, em gramas, capturada nos ciclos de filtração em questão, T_t é o tempo total da filtração, em segundos, T_i é o tempo correspondente a

cada ponto registrado pelo sistema de aquisição de dados, também em segundos e A é a área de filtração, em centímetros quadrados.

Na construção do gráfico da Figura 4.4, o eixo das abscissas representa a carga mássica acumulada nos ciclos de filtração, ou seja, à massa filtrada do segundo ciclo somou-se o valor final da massa filtrada no primeiro ciclo e assim sucessivamente. Foi traçada uma curva média dos ensaios de cada ciclo, até 100 mmH₂O, e o ciclo seguinte foi construído partindo-se do último valor da abscissa desta curva média. Assim obteve-se um gráfico com as curvas de filtração em seqüência.

A partir da análise da Figura 4.4, verifica-se que no primeiro ciclo há uma maior evidência da filtração interna, conforme prevê a literatura, seguido de uma fase de transição e, logo após, de uma etapa de filtração superficial, com aumento linear da perda de carga com a massa capturada.

A filtração interna torna-se quase desprezível nos ciclos subseqüentes, sendo a taxa de aumento da perda de carga significativamente superior àquela apresentada no primeiro ciclo.

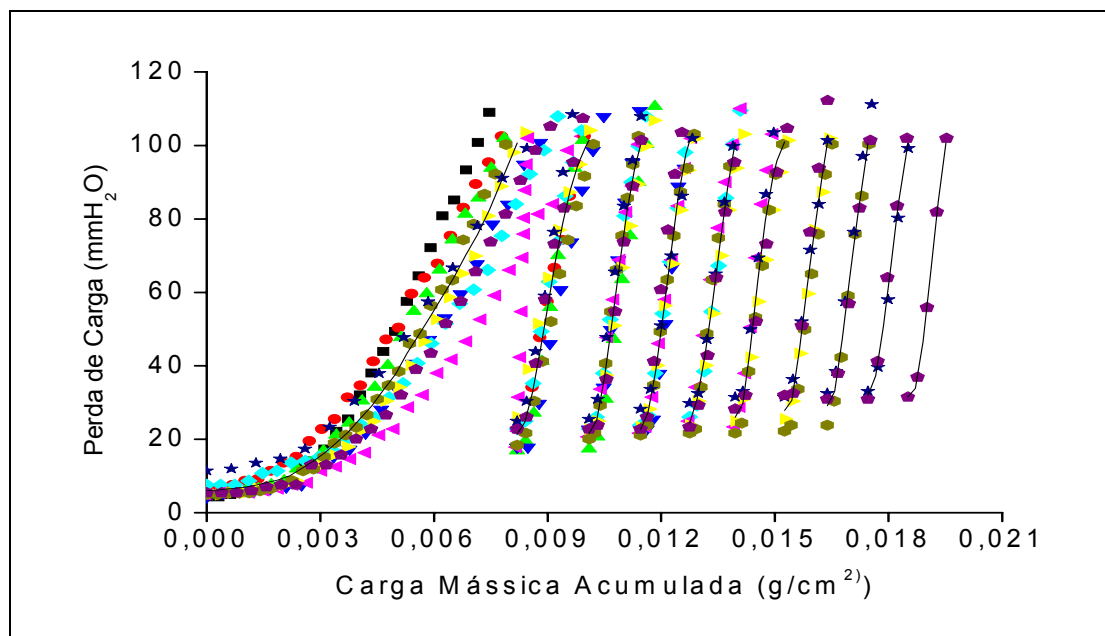


Figura 4.4: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração do Acrílico e rocha fina.
(!) Ensaio 01; (,) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (A) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06;
(β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

O ponto de colmatação médio dos dez primeiros ciclos foi determinado graficamente, conforme metodologia descrita no Capítulo 2, a partir da dez curvas correspondentes ao ciclo 1, apresentadas na Figura 4.4. O valor obtido foi igual a $3,10 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \pm 6,6 \cdot 10^{-4}$. Esta variação é consequência da heterogeneidade do meio filtrante, sendo que depois que o tecido foi saturado com partículas nos ciclos subsequentes, as curvas tornam-se bastante próximas. Este comportamento foi observado em todos os experimentos.

Nota-se na Figura 4.4 que o primeiro ciclo do Ensaio 06 apresentou comportamento distinto, provavelmente por alguma alteração experimental não determinada. O desvio de comportamento prosseguiu também no segundo ciclo, mas nos ciclos seguintes realizados no Ensaio 06 o comportamento voltou a obedecer ao padrão dos demais.

Uma segunda constatação é referente ao decréscimo de massa coletada (filtrada) em cada ciclo, como resultado da retenção de partículas após a limpeza, e consequente tendência de saturação do conjunto torta-tecido. A Tabela 4.3 apresenta os valores da massa filtrada em cada ciclo, considerando-se o valor médio dos dez ensaios.

Admitindo-se que a massa de pó alimentada foi praticamente constante, verificou-se que, com a diminuição da massa filtrada diminuiu, consequentemente, a duração da filtração, já que a perda de carga máxima de $100 \text{ mmH}_2\text{O}$ foi alcançada mais rapidamente. No entanto, após o 3º ciclo verificou-se que a taxa de diminuição da massa coletada foi menor, com tendência a permanecer constante com o número de ciclos.

Tabela 4.3: Variação da massa coletada média com o número de ciclos para o Acrílico e rocha fina.

Ciclo	Massa (g/cm²)
1	0,0082
2	0,0019
3	0,0013
4	0,0013
5	0,0012
6	0,0013
7	0,0011
8	0,0011
9	0,0010
10	0,0010

Outra observação importante apresentada na Figura 4.4 está relacionada à forma das curvas dos ciclos que, a partir do segundo ciclo possuem o formato de “S”, que vai sendo amenizado e se tornando quase uma reta nos ciclos finais. Essa formação é verificada nos demais experimentos realizados neste trabalho, bem como em outros trabalhos da área, e remete ao comportamento do primeiro ciclo das curvas da Figura 4.2, quando submetidas a perdas de carga elevadas.

Este comportamento não linear das curvas de filtração, segundo descrito no trabalho de MOREIRA et al. (1999), pode estar associado à eficiência de limpeza, sendo que os autores observaram que quanto maior a eficiência de remoção, mais próximo de uma reta seria o comportamento, e quanto menor a regeneração do tecido, maior a concavidade apresentada pelas curvas, e portanto, mais distante da linearidade.

No entanto, quanto à não linearidade do início das curvas de filtração, deve ser citado o fato de que, em outros trabalhos o intervalo de aquisição de dados era maior que os 5 segundos utilizados neste trabalho. Assim, esta primeira fase não apareceu em outros estudos analisados, inclusive no de MOREIRA et al. (1999), por sua curta duração, equivalente a poucos segundos nestes experimentos.

Pode ser também que, como a remoção ocorre em blocos (patchy cleaning), a superfície original de filtração efetiva seja reduzida após a limpeza, e a velocidade nas áreas regeneradas seja maior que no primeiro ciclo (MANUAL VDI), ou seja, ocorrem canais preferenciais na superfície do tecido até que, com a formação de uma nova torta, este comportamento seja normalizado, ou melhor, linearizado.

Considerando-se a seção linear das curvas de filtração em todos os ciclos, pode-se fazer uma avaliação do desenvolvimento da resistência específica da torta em cada ciclo. A média de cada ciclo dos ensaios realizados está apresentada na

Tabela 4.4, sendo que o valor referente ao segundo ciclo foi calculado desconsiderando-se o dado do Ensaio 6, que deu muito discrepante dos demais, devido à alguma alteração experimental não determinada. O ponto correspondente ao ciclo 10 não possui desvio padrão, pois houve apenas um ponto (o ciclo 10 do ensaio 10), como explicado no Capítulo 3.

Para o Acrílico, verificou-se que a taxa de aumento da resistência efetiva da torta diminuiu ciclo a ciclo, sendo muito maior entre o primeiro e o segundo ciclo. No entanto, estes valores se mantiveram muito próximos após o quinto ciclo.

Tabela 4.4: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha fina.

Ciclo	K_2 (s ⁻¹)	Desvio padrão
1	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
2	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$
3	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$
4	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$
5	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$
6	$6,9 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$
7	$7,0 \cdot 10^{-5}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
8	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$
9	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$
10	$8,7 \cdot 10^{-4}$	-

A redução da duração dos ciclos de filtração apresentada na Figura 4.4 pode ser resultado não apenas do aumento da resistência específica da torta, mas também do acúmulo de partículas no meio filtrante. Esta constatação se confirma ao se analisar a Figura 4.5, em que se verifica que a massa retida acumulada, a exemplo da massa coletada, apresenta a tendência a tornar-se constante a partir do quinto ciclo, coincidindo com o ciclo em que a resistência específica da torta torna-se aproximadamente constante.

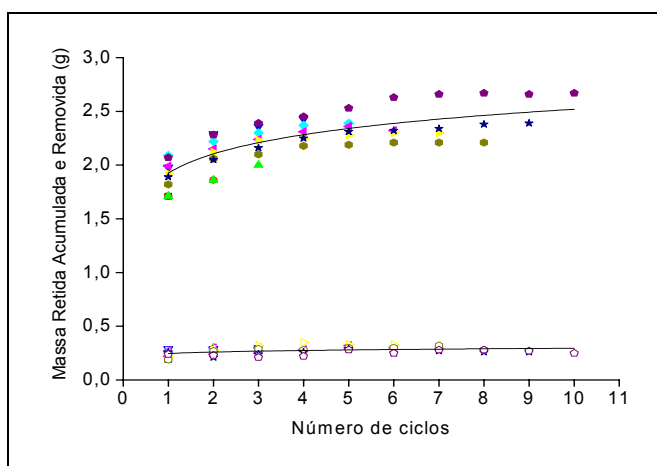


Figura 4.5: Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**), para o AC e rocha fina: (!∇) Ensaio 01; (-) Ensaio 02; (78) Ensaio 03; (BX) Ensaio 04; (AM) Ensaio 05; (QΞ) Ensaio 06; (βχ) Ensaio 07; (μν) Ensaio 08; (ξψ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

Quanto à massa removida, verifica-se pouca variação em seu comportamento, sendo este praticamente constante desde o primeiro ciclo. Deste modo, pode-se

presumir que, a partir do quinto ciclo, a massa que foi coletada na filtração passa a ser removida na limpeza. Como consequência deste acúmulo de partículas nos ciclos iniciais, ocorreu um aumento da perda de carga inicial nos ciclos subsequentes à primeira limpeza. Esta diferença, denominada perda de carga residual, pode ser mais bem visualizada pela Figura 4.6.

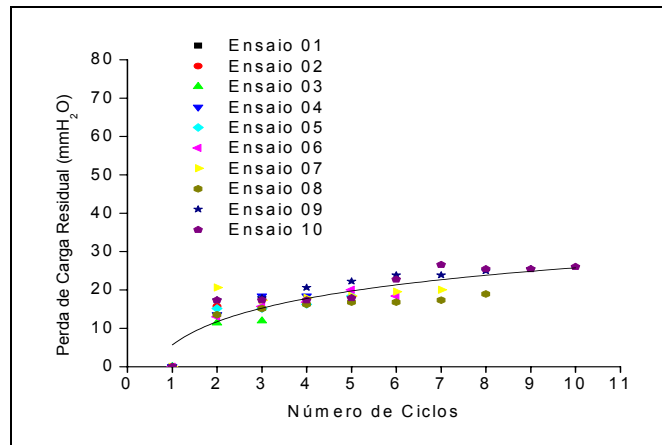


Figura 4.6: Perfil da variação de perda de carga residual para os ensaios com Acrílico e rocha fina.

Verifica-se que a perda de carga residual tendeu a apresentar um comportamento semelhante ao da curva de massa retida, sendo que o valor máximo não ultrapassou 30 mmH₂O, e tornou-se constante nos ciclos finais. Este fato revela uma relação entre a massa retida e a perda de carga residual, mostrada pela Figura 4.7, para o caso destes experimentos, apesar das variações de ciclo para ciclo, que podem ser atribuídas à heterogeneidade do meio filtrante ou a erros da balança, visto que as massas são relativamente pequenas.

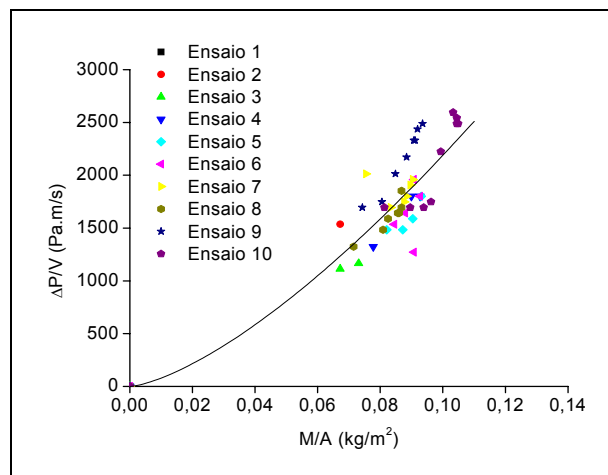


Figura 4.7: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Acrílico e rocha fina.

A curva de tendência destes pontos expressam o comportamento de uma equação potencial, do tipo $y = a.x^b$, que pode ser expressa pela equação 4.2:

$$\frac{\Delta P}{V} = 60451 \left(\frac{M_{ret}}{A} \right)^{1,44} \quad (4.2)$$

Com o objetivo de verificar a relação da eficiência de remoção de pó e a perda de carga residual, construiu-se o gráfico de fração de massa removida, apresentado na Figura 4.8.

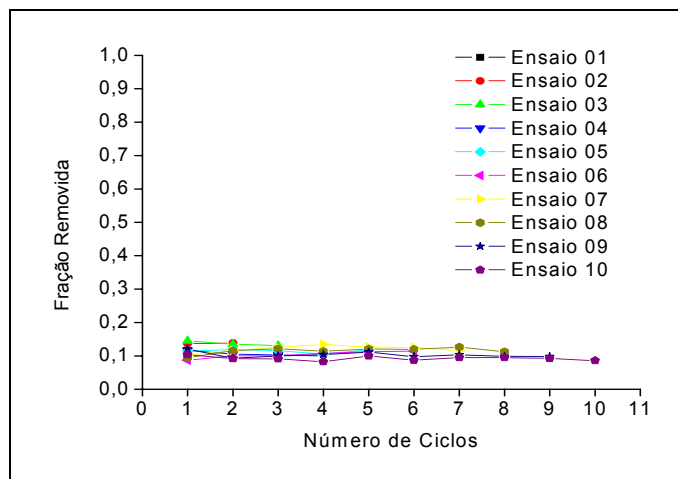


Figura 4.8: Perfil da fração de massa removida da torta, para o Acrílico e rocha fina.

Verifica-se que a eficiência de remoção, além de constante, foi bastante reduzida, sendo menor que 20% da massa de pó total no filtro após cada filtração.

No entanto, deve-se ressaltar que a espessura de torta formada foi pequena, o que pôde ser observado pelos baixos valores de massa coletada por unidade de área.

Com estes valores de eficiência de limpeza reduzidos, pode-se considerar que a forma em “S” das curvas subseqüentes à primeira limpeza possam realmente ser atribuídas a uma limpeza deficiente, como comentado por MOREIRA et al. (1999).

Pode ser que com a pequena espessura da torta, a eficiência de limpeza seja reduzida porque parte significativa do material pulverulento permaneça no interior do meio filtrante.

Esta acomodação pode ser observada pela Figura 4.9, em uma camada de aproximadamente 500 μm , correspondente às cinco primeiras fotos do interior do tecido, para alguns dos ciclos de filtração.

Verifica-se a heterogeneidade do processo, sendo nítida a ocorrência de um maior número de partículas nas camadas mais superficiais do tecido, bem como a permanência de uma camada de torta remanescente em alguns ciclos e a ocorrência de camadas sem torta nenhuma em outros (caso da coluna correspondente ao Ciclo 03b), o que ilustra a remoção em blocos.

Outra importante observação é o fato de que as partículas de rocha fosfática fina permanecerem muito próximas das fibras, principalmente nas fibras mais internas do tecido (ou nas fibras mais profundas) podendo ser os resquícios dos dendritos formados.

A avaliação da penetração de partículas no Acrílico pode ser realizada considerando-se a Tabela 4.6, em que é possível verificar a variação da profundidade de penetração de partículas com o número de ciclos, bem como a variação do diâmetro médio das partículas com a profundidade do tecido e com o número de ciclos.

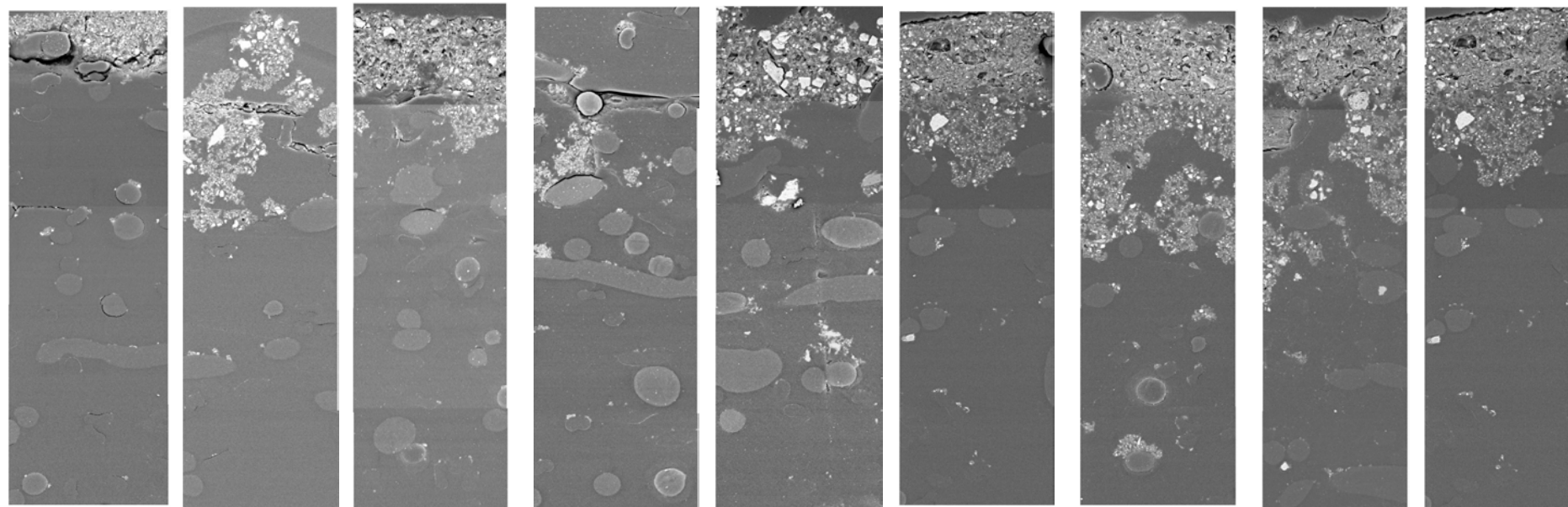
Verifica-se que o diâmetro de partículas não apresentou tendência de aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

Do mesmo modo, não foi observada variação considerável do diâmetro de partículas com a profundidade do meio filtrante.

Pode-se observar que a profundidade média variou entre cerca de 480 e 750 μm , aproximadamente, sem apresentar tendência definida de aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

Além disso, pela Tabela 4.6, pode-se verificar o desvio padrão de cada amostra apresentada na Tabela 4.5, cujos dados não foram colocados juntos por uma questão de espaço.

Interface torta-ar



Ciclo 01a

Ciclo 01b

Ciclo 03a

Ciclo 03b

Ciclo 04a

Ciclo 04b

Ciclo 05a

Ciclo 05b

Ciclo 10

Interior do meio filtrante (aproximadamente 500 μm da superfície do tecido)

Figura 4.9: Seção transversal do acrílico em diferentes ciclos

Tabela 4.5: Penetração de partículas de rocha fina no Acrílico: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.

Diâmetro de partículas (µm)																				
Profundidade	Ensaio																			
(µm)	1				2				3				4				5			
0-107	1,456	1,076	1,333	1,382	1,086	1,105	1,443	1,016	0,971	1,152	1,010	0,977	1,584	1,489	1,544	1,623	0,935	1,164	2,365	2,025
107-214	1,028	0,945	1,447	0,953	1,148	0,958	1,278	0,91	1,038	1,154	0,946	0,947	1,255	1,139	1,611	1,325	0,985	1,109	2,373	1,986
214-321	1,145	1,065	0,998	0,853	1,183	1,099	1,225	0,994	0,960	1,06	0,733	0,979	1,163	0,980	1,024	-	1,016	1,122	2,292	1,651
321-428	1,237	0,868	1,261	-	1,176	1,239		1,336	1,054	1,235	-	0,789	1,098		0,904	1,081	0,788	1,905		
428-535	1,022	0,811	1,001	0,658	0,938	1,737		0,841	0,838	0,977	0,975	1,317			1,442	1,100	0,825	0,900	1,492	
535-642	0,653		0,995	0,754	1,02	1,869		1,063	0,737	1,099	-				0,8	0,879	0,81		1,988	
642-749	0,636		0,656		1,212	0,889		0,876			1,059				0,96	1,623	0,614			
749-856	0,521		1,201			1,357		0,796		0,957							0,696			
856-963			0,721					1,423		0,849							0,620			
963-1070			0,819							0,794										
Profundidade média (µm)	722,3				749				749				588,5				615,3			
(µm)	6				7				8				9				10			
0-107	1,200		1,332		0,967		-		1,641		1,089		0,990		0,898		1,017	0,798	0,954	0,819
107-214	1,269		1,212		0,885		0,91		1,966		0,86		1,003		0,968		1,148	0,775	0,852	
214-321	1,087		0,887		-		0,945		1,93		0,973		0,933		-		1,227	1,426	0,800	
321-428	0,825		-		0,908		0,917		1,099		1,468		0,823		1,112		0,828	1,053	0,535	
428-535	0,746		0,746		0,867		0,786				-				0,989		1,221		-	
535-642	1,054						1,277				1,179				1,214		1,238		0,733	
642-749																	0,558			
749-856																	0,681			
856-963																				
963-1070																				
Profundidade média (µm)	588,5				588,5				535				481,5				508,3			

Tabela 4.6: Desvio padrão do diâmetro de partículas em cada camada analisada do Acrílico.

Desvio padrão																				
Profundidade	Ensaio																			
(μm)	1				2				3				4				5			
0-107	0,737	1,161	1,328	1,304	1,088	0,973	1,675	0,873	0,710	1,078	0,947	0,985	1,905	2,352	1,625	1,564	0,787	1,164	2,665	2,197
107-214	0,921	1,022	1,516	0,514	0,984	0,330	1,298	0,850	0,744	1,104	0,736	0,662	1,535	1,261	1,867	1,337	0,825	1,179	2,957	3,105
214-321	0,824	0,932	0,542	0,510	0,792	0,945	0,729	1,231	0,711	0,581	0,435	0,763	1,275	1,371	0,682		0,833	1,092	3,205	2,621
321-428	0,551	0,574	1,186		0,899	0,912		1,578	0,701	0,676	0,000	0,551	1,323		0,619	0,850	0,613	4,751		
428-535	0,505	0,348	0,862	0,350	0,990	2,295		0,542	0,691	0,816	0,716	0,563			1,249	0,721	0,649	0,548	1,502	
535-642	0,402		0,739	0,212	0,540	1,754		0,957	0,355	0,017	0,000				0,497	0,457	0,574		1,164	
642-749	0,425		0,383		1,058	0,588		0,573		0,000	0,395				0,815	0,000	0,336			
749-856	0,340		0,840			1,093		0,563		0,490							0,509			
856-963			0,386					1,451		0,419							0,417			
963-1070			0,418							0,369										
(μm)	6				7				8				9				10			
0-107	1,101		1,498		0,709				2,107		0,935		0,997		0,876		0,792	0,663	0,850	0,563
107-214	1,078		1,098		0,741		0,694		2,220		0,593		0,632		0,599		1,183	0,474	0,744	
214-321	1,056		0,995				0,769		3,043		0,610		0,588		0,000		0,845	2,446	0,463	
321-428	0,577				0,657		0,719		1,033		0,822		0,521		0,696		0,544	0,775	0,222	
428-535	0,433		0,499		0,572		0,552				0,000				0,430		0,741			
535-642	0,821						1,170				0,927				0,722		1,111		0,330	
642-749																	0,289			
749-856																	0,076			
856-963																				
963-1070																				

A Figura 4.10 apresenta a variação do número de partículas em cada camada de tecido, para cada ciclo.

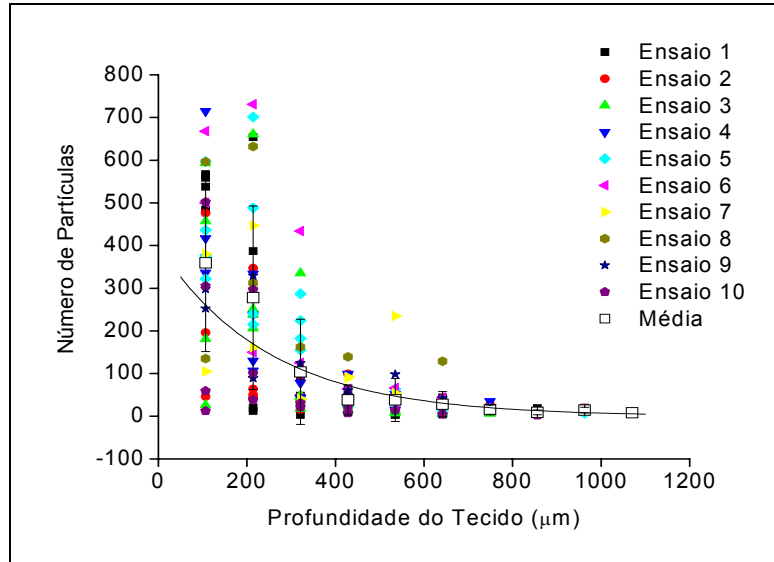


Figura 4.10: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Acrílico.

Verifica-se que, a exemplo do diâmetro de partículas, não há tendência definida do número de partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

No entanto, como observado pelas microfotografias, é evidente que a maior parte das partículas concentra-se nas camadas mais superficiais do tecido, tendendo a diminuir potencialmente com a profundidade, sendo que o máximo de partículas retidas foi em torno de 700.

A linha de tendência foi traçada utilizando-se um ajuste exponencial sobre a média do número de partículas em cada camada analisada, e a barra de erros expressa o desvio padrão em cada ponto.

Os valores dos números de partículas no interior do acrílico podem ser observados também pela Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Acrílico e rocha fina.

Número de partículas																				
Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				4				5			
0-107	567	538	559	483	196	476	357	46	593	181	457	26	372	336	417	715	376	597	436	322
107-214	12	654	387	20	50	43	347	64	661	206	251	238	238	107	130	334	701	240	488	215
214-321	48	92	18	3	42	47	35	15	335	44	18	48	44	78	44	0	287	224	155	182
321-428	11	22	63	0	10	99		23	14	26	0	38	99		43	20	38	24	0	
428-535	5	3	14	8	21	13		28	14	56	7	10			52	15	64	31	27	
535-642	44		40	4	7	28		18	7	6	0				18	16	33		11	
642-749	11		18		28	18		19		0	6				35	0	18			
749-856	4		19			11		11		8							8			
856-963			20					19		9							7			
963-1070			8							8										
soma	702	1309	1146	518	354	735	739	243	1624	544	739	360	753	521	739	1100	1532	1116	1117	719
Profundidade (μm)	6				7				8				9				10			
	0-107	500		668	105		0		596		135		298		252		305	12	502	59
107-214	150		731	161		380		312		632		329		89		297	38	100		
214-321	434		125	0		447		162		31		124		0		21	30	96		
321-428	64		0	92		41		139		32		49		61		25	24	7		
428-535	31		66	235		90				0				98		14		0		
535-642	44					54				129				42		21		4		
642-749																	13			
749-856																	2			
856-963																				
963-1070																				
soma	1223		1590	593		1012		1209		959		800		542		698	104	709	59	

4.4 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO POLIPROPILENO E ROCHA FINA (3,71 μM)

Os resultados obtidos para o Polipropileno estão apresentados na Figura 4.11. Verifica-se que o comportamento das curvas de filtração do Polipropileno foi qualitativamente semelhante ao do acrílico.

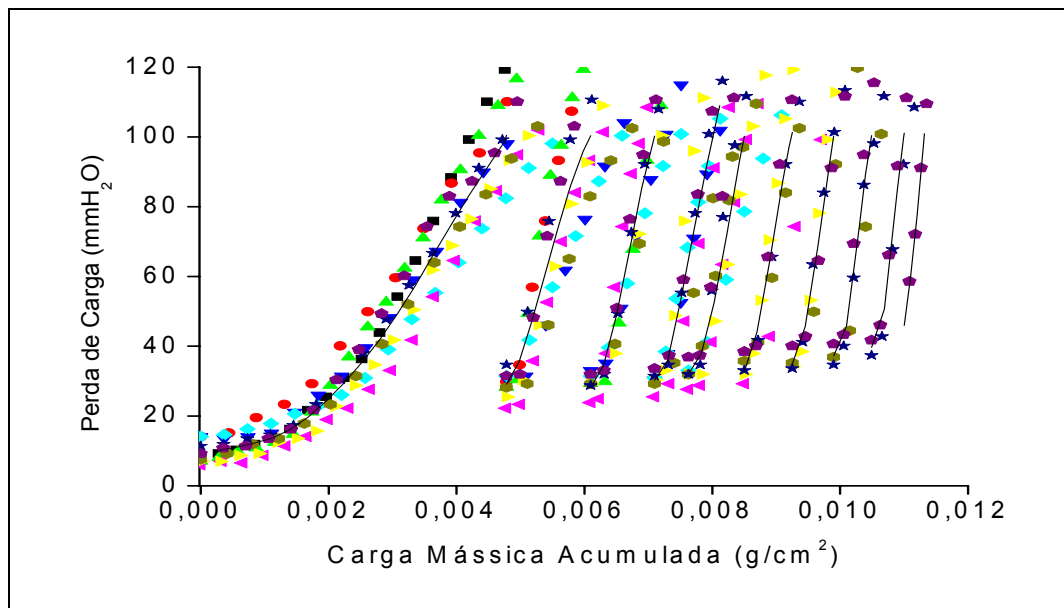


Figura 4.11: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o Polipropileno e rocha fina: (!) Ensaio 01; (,) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (Δ) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06; (β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (\square) Ensaio 10.

Porém, apesar de também diminuir ciclo a ciclo, a massa coletada foi menor em todos os ciclos, quando em comparação com o Acrílico, como apresenta a Tabela 4.7. Além disso, a massa coletada apresentou uma tendência decrescente nos dez ciclos analisados, sem se tornar constante. Observa-se que a massa coletada neste tecido diminuiu em uma ordem de grandeza do primeiro para o décimo ciclo.

A primeira fase da filtração também apresentou uma menor duração em relação ao Acrílico. Possivelmente, esse comportamento pode indicar uma menor penetração de partículas no interior do tecido, o que será verificado nas análises de profundidade de penetração que seguem, em que são apresentados os resultados comparativos entre os tecidos. Conforme os resultados de KANAOKA et al. (2001), esta menor duração dos ciclos pode ser atribuída à menor permeabilidade e menor porosidade deste tecido, como apresentado na Tabela 4.2, em relação ao acrílico.

Por esta mesma razão, pode-se atribuir o menor valor do ponto de colmatção médio dos dez primeiros ciclos, determinado graficamente a partir da Figura 4.12, igual a $1,21.10^{-3} \text{ g/cm}^2 \pm 3,1.10^{-4}$, quando comparado ao Acrílico.

Tabela 4.8: Variação da massa filtrada média com o número de ciclos para o polipropileno

Ciclo	Massa (g/cm²)
1	0,0048
2	0,0013
3	0,0010
4	0,0005
5	0,0009
6	0,0008
7	0,0007
8	0,0006
9	0,0005
10	0,0003

Outra constatação a partir da Figura 4.11, foi a de que as curvas apresentaram um comportamento tipo “S” mais evidente nos ciclos iniciais, se forem comparadas ciclo a ciclo com o Acrílico.

Além disso, a resistência específica da torta tendeu a aumentar a cada ciclo, como pode ser comprovado pela Tabela 4.9.

Estes valores não apresentaram tendência a tornarem-se constantes dentro do número de ciclos realizados neste trabalho.

Tabela 4.9: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Polipropileno e rocha fina.

Ciclo	K₂ (s⁻¹)	Desvio padrão
1	$2,7.10^5$	$3,5.10^4$
2	$5,8.10^5$	$1,5.10^5$
3	$8,1.10^5$	$1,9.10^5$
4	$9,1.10^5$	$2,4.10^5$
5	$9,3.10^5$	$3,3.10^5$
6	$1,0.10^6$	$2,5.10^5$
7	$1,2.10^6$	$1,9.10^5$
8	$1,2.10^6$	$2,2.10^5$
9	$1,4.10^6$	$1,9.10^5$
10	$1,9.10^6$	-

No entanto, não apenas estes resultados explicam os ciclos cada vez mais curtos para o Polipropileno, mas também a massa acumulada no meio filtrante, que aumentou ciclo a ciclo e tendeu a ser constante após o sexto ciclo, como apresentado na Figura 4.12. A massa removida após a limpeza, porém, se manteve praticamente constante em todos os ensaios, a exemplo do que ocorreu com o Acrílico.

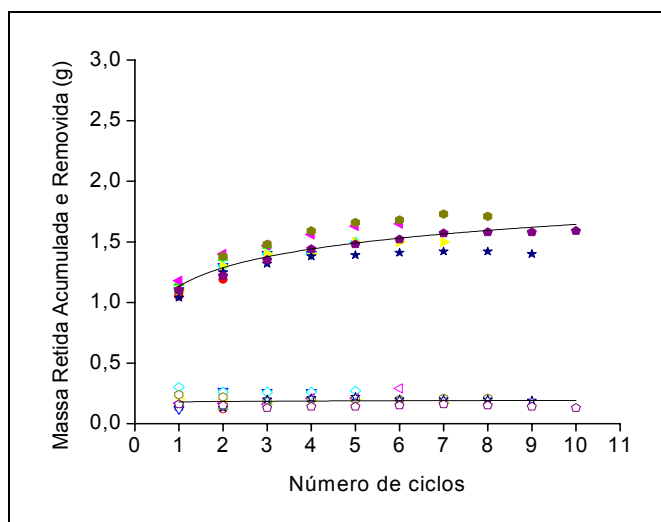


Figura 4.12 : Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o PP e rocha fina: (!▽) Ensaio 01; (,-) Ensaio 02; (78) Ensaio 03; (BX) Ensaio 04; (AM) Ensaio 05; (ΩΞ) Ensaio 06; (βχ) Ensaio 07; (μν) Ensaio 08; (ξψ) Ensaio 09; (□□) Ensaio 10.

Verifica-se, na Figura 4.13, que o aumento da massa retida no meio filtrante provocou também o aumento da perda de carga residual a cada ciclo.

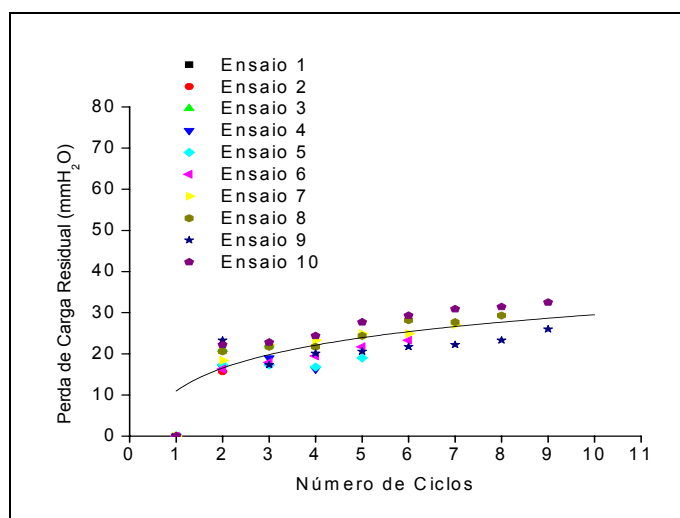


Figura 4.13 : Perfil da perda de carga residual para os experimentos com Polipropileno.

Por meio desta Figura, fica evidente o fato da perda de carga não se tornar constante nos dez ciclos estudados, apresentando para estes, um crescimento logarítmico com o número de ciclos.

Fazendo-se uma associação da perda de carga residual com a massa retida acumulada no filtro de polipropileno, tem-se, pela Figura 4.14, que há uma relação entre a massa retida e a perda de carga residual, de modo que as curvas de cada ensaio tendem a serem próximas a uma reta.

No entanto, pode-se fazer um ajuste potencial dos resultados, de modo que a equação possa ser representada pela equação 4.3:

$$\frac{\Delta P}{V} = 139816 \cdot \left(\frac{M_{ret}}{A} \right)^{1,42} \quad (4.3)$$

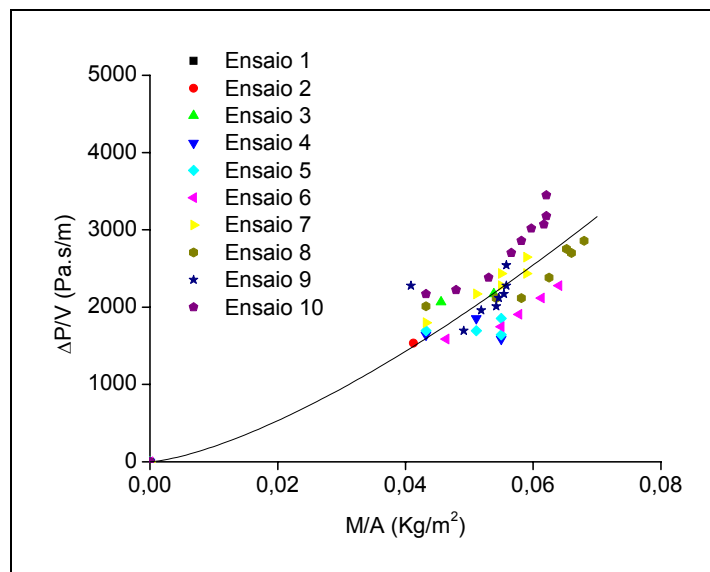


Figura 4.14: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Polipropileno e rocha fina.

A eficiência de remoção responsável por esta perda de carga residual pode ser visualizada na Figura 4.15.

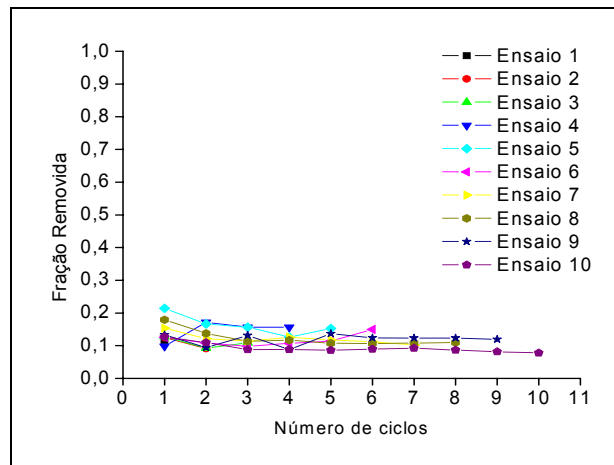


Figura 4.15: Perfil da fração removida de torta, após a limpeza, para o Polipropileno e rocha fina.

A partir da observação da Figura 4.15, pode-se constatar que a eficiência de remoção de pó permaneceu abaixo de 20%. Observou-se que a maior perda de carga residual apresentada pelo Polipropileno coincidiu com a maior intensidade do formato em “S” apresentados nos experimentos com o Polipropileno, fato que, segundo MOREIRA et al. (1999), poderia ser atribuído a uma menor eficiência de remoção. No entanto, o formato das curvas parece estar mais relacionado aos valores de perda de carga residual que aos valores de eficiência, quando comparados ao Acrílico, uma vez que as eficiências de remoção foram bem próximas e a perda de carga residual foi diferente. Assim, parece que quanto maior a perda de carga residual, maior a tendência do comportamento em “S” quando se compara dois tecidos diferentes.

Considerando-se o comportamento peculiar do Polipropileno quanto ao seu menor período de filtração interna, à sua perda de carga residual elevada, aos seus ciclos mais curtos, e à sua menor porosidade e permeabilidade, investigou-se a penetração de partículas em seu interior para os dez ciclos.

A Figura 4.16 apresenta as imagens obtidas em MEV para algumas colunas de alguns ciclos analisados, sendo apresentadas as cinco primeiras fotos, que correspondem a uma profundidade de aproximadamente 500 μm da superfície até o seio do filtro. As imagens de MEV mostram que o Polipropileno apresentou uma maior densidade de fibras com relação ao Acrílico. A Tabela 4.10 apresenta a profundidade de penetração e o diâmetro das partículas em cada ciclo, e a Tabela 4.11 apresenta o desvio padrão destes dados.

Interface torta-ar

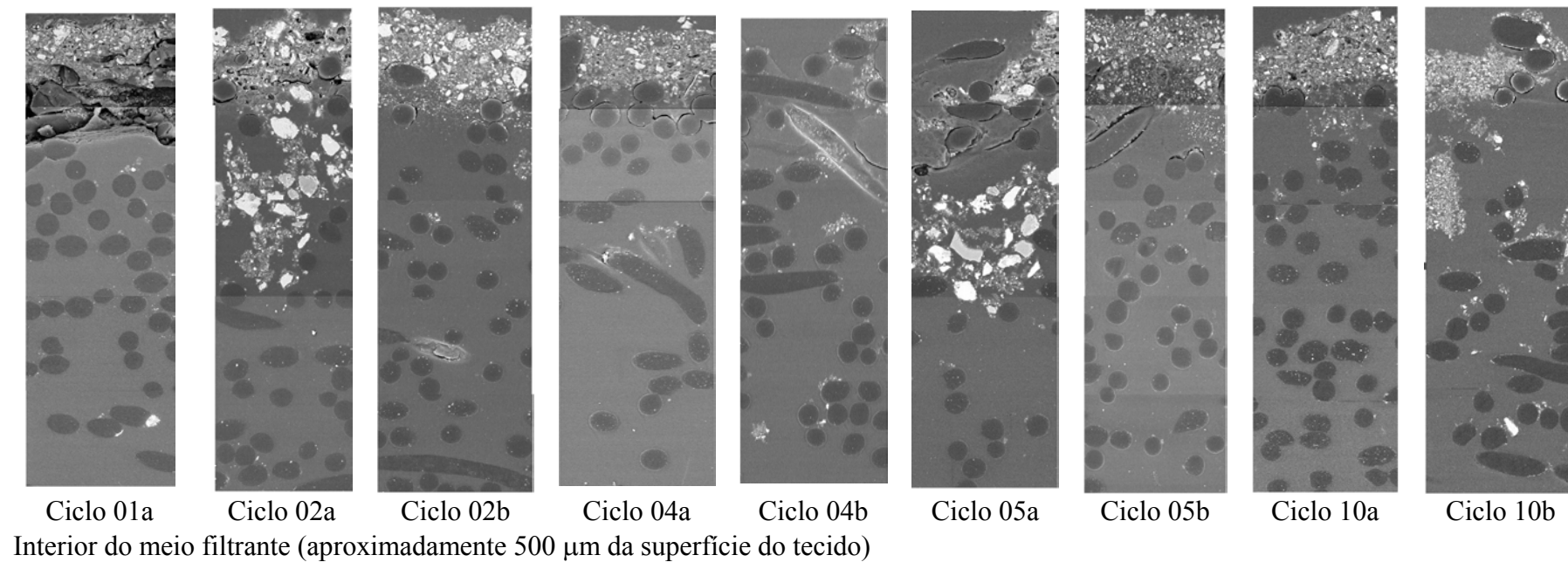


Figura 4.16: Seção transversal do polipropileno em diferentes ciclos

Tabela 4.10: Penetração de partículas de rocha fina no Polipropileno: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.

Diâmetro de partículas (μm)																				
Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				4				5			
0-107	1,133	1,305	1,260	1,402	1,360	1,406	1,460	0,939	1,270	1,170	1,523	0,998	1,312	0,998	1,514	1,715	1,302	1,306	1,171	2,085
107-214	0,782	0,813	1,397	1,219	1,654	1,744	1,011	0,992	0,981	1,200	0,941	0,896	0,850	0,928	2,354	2,385	1,625	1,181		
214-321	0,656	0,948	1,087	0,827		1,412	1,200	1,062	1,003	1,398	0,933	1,105	1,145	1,252	2,182		1,506	0,684		
321-428	0,467		1,100	0,999				0,906	0,900			0,975		1,103			1,326	0,679		
428-535	0,851													0,994			0,765			
535-642														0,929						
642-749																				
749-856																				
856-963																				
963-1070																				
Profundidade média (μm)	428,000				321,000				374,500				374,500				248,75			
(μm)	6				7				8				9				10			
0-107	1,296	1,517	1,264	1,257	1,378		1,376		0,942		1,097		1,012		1,084		1,147	0,978	1,0027	1,156
107-214	-	1,331	1,002	1,02	0,754				1,294		1,935		1,043		1,214		0,8728		1,0451	1,05
214-321	1,151	0,835	1,311		1,438				1,844		3,892		1,207		1,248		0,7231		1,0215	0,942
321-428	0,806	-	0,83						0,723				0,91		0,878		0,8248		1,2461	0,852
428-535	-	0,743													0,69				1,0859	0,861
535-642	0,774	1,517																	1,182	
642-749																			0,815	
749-856																				
856-963																				
963-1070																				
Profundidade média (μm)	331,5				267,5				374,5				481,5				454,75			

Pode-se observar, pela Tabela 4.10, que a profundidade média variou entre 250 e 480 μm , aproximadamente, sem apresentar tendência definida de aumentar ou diminuir com o número de ciclos. O diâmetro de partículas também não apresentou tendência de aumentar ou diminuir com o número de ciclos, assim como não foi verificada variação significativa do diâmetro com a profundidade do meio filtrante.

A Figura 4.17 apresenta a variação do número de partículas em cada camada de tecido, para cada ciclo. Observa-se que não houve tendência definida do número de partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos, como ocorreu com o diâmetro de partículas. No entanto, é evidente que a maior parte das partículas concentrou-se nas camadas mais superficiais do tecido, tendendo a diminuir exponencialmente com a profundidade, sendo que o máximo de partículas retidas foi em torno de 1.000. Este elevado valor pode ser atribuído ao fato de que, como a remoção ocorreu aos pedaços, esteja sendo contadas partículas da torta.

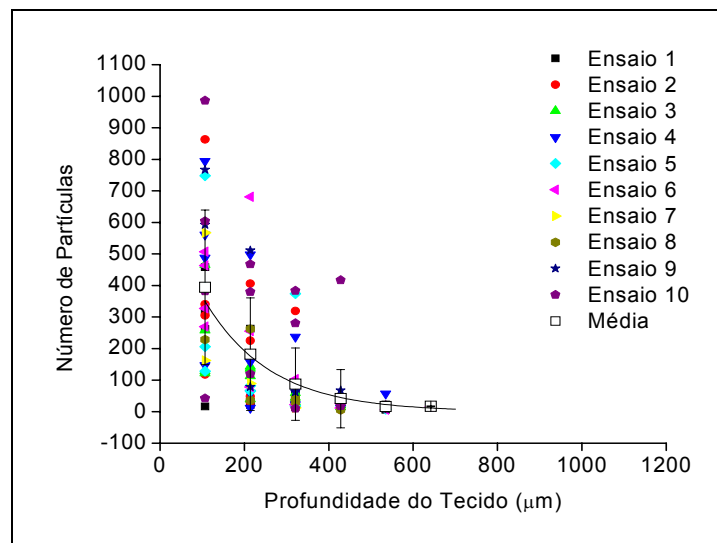


Figura 4.17: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Polipropileno e rocha fina.

Verifica-se que após 400 μm , encontram-se poucas partículas no interior do tecido, sendo a imensa maioria distribuída na camada mais superficial do tecido.

Observou-se também que, em termos numéricos, não houve tendência do número de partículas variar com os ciclos.

Os valores do número de partículas no interior do polipropileno podem ser observados pela Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Polipropileno e rocha fina.

Profundidade (μm)	Número de partículas																			
	Ensaio																			
	1				2				3				4				5			
0-107	16	262	458	321	305	340	863	118	258	129	465	122	561	147	794	488	128	394	206	748
107-214	32	21	174	263	48	406	225	30	112	136	143	39	12	60	157	498	65	82		
214-321	14	54	36	61		319	19	11	59	45	31	25	23	65	0	237	374	18		
321-428		14	14	16				6	21			14		12	29		34	36		
428-535		6												57	17		7			
535-642														18						
642-749																				
749-856																				
856-963																				
963-1070																				
soma	62	357	682	661	353	1065	1107	165	450	310	639	200	596	359	997	1223	608	530	206	748
(μm)	6				7				8				9				10			
0-107	269	507	463	327	162		567		228		389		767		592		382	604	42	986
107-214	0	681	255	78	89				35		262		511		78		119	380		467
214-321	103	22	22		12				43		29		62		76		10	383		280
321-428	26	0	11						5				22		67		417	18		18
428-535	0	6													9			18		20
535-642	16																			
642-749																				
749-856																				
856-963																				
963-1070																				
soma	414	1216	751	405	263		567		311		680		1362		822		928	1403	42	1771

4.5 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO POLIÉSTER TRATADO E ROCHA FINA (3,71 μM)

Após a realização dos experimentos com o Acrílico e com o Polipropileno, verificou-se que o tempo despendido no tratamento das amostras e o fator econômico pesariam para o fechamento deste trabalho. Além disto, como as análises de penetração de partículas não apresentaram variação significativa com o número de ciclos, nos experimentos com acrílico e com polipropileno, optou-se por fazer as análises pertinentes ao desenvolvimento da pesquisa apenas para os Ensaio 01, 02, 03, 05 e 10. Os quatro primeiros testes foram escolhidos por serem aqueles em que houve uma maior variação de massa retida, de modo a se esperar também que, se houvesse uma variação na profundidade de penetração, seria nestes ciclos detectada, uma vez que o conjunto torta-tecido ainda não estaria saturado. O décimo ciclo foi escolhido por apresentar a condição final dos ensaios.

Similarmente aos experimentos realizados anteriormente, o perfil da perda de carga com a carga mássica acumulada se manteve, assim como a tendência do ciclo se tornar cada vez mais curto, até uma aparente estabilização, como apresenta a Figura 4.18.

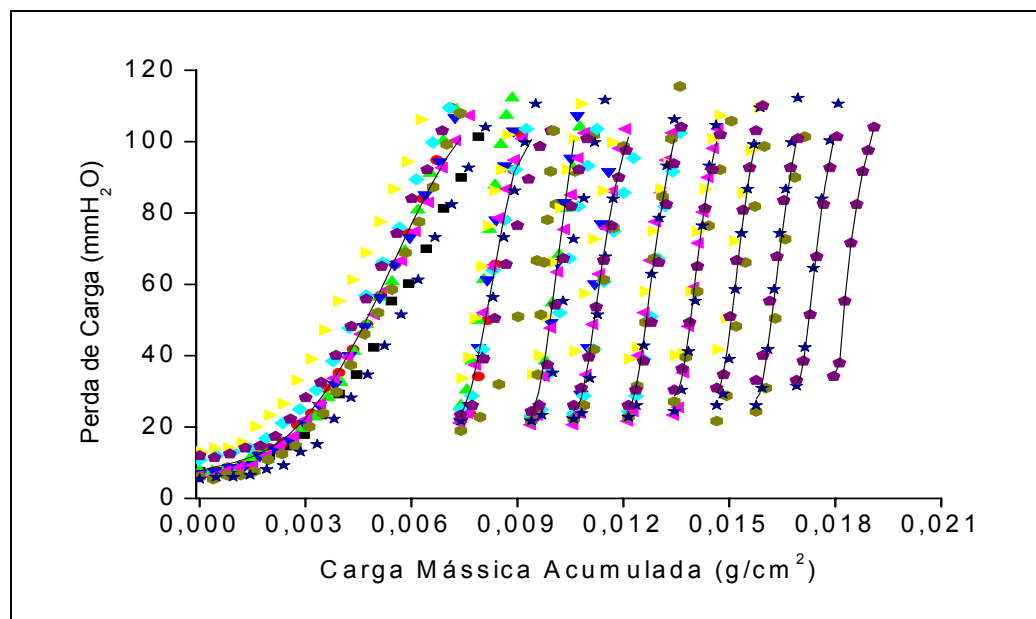


Figura 4.18: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o Poliéster tratado e rocha fina. (!) Ensaio 01; (.) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (A) Ensaio 05; (Q) Ensaio 06; (ß) Ensaio 07; (µ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

O comportamento da massa coletada foi semelhante ao Acrílico, como apresenta a Tabela 4.13. Para este tecido o comportamento em “S” das curvas dos ensaios 2 a 10 apresentaram uma curvatura também semelhante à apresentada pelo Acrílico.

Tabela 4.13: Variação da massa coletada média com o número de ciclos para o poliéster tratado.

Ciclo	Massa (g/cm²)
1	0,0074
2	0,0020
3	0,0012
4	0,0015
5	0,0013
6	0,0012
7	0,0011
8	0,0011
9	0,0010
10	0,0010

A primeira fase da filtração apresentou uma duração um pouco menor em relação ao acrílico. Possivelmente, esse comportamento pode indicar uma menor penetração de partículas, o que pode ser observado pelo valor do ponto de colmatação médio, igual a $2,45 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \pm 5,5 \cdot 10^{-4}$, obtido através dos dez primeiros ciclos apresentados na Figura 4.18.

Além da aparente estabilização da massa filtrada em poliéster nos ciclos finais, observada na Tabela 4.13, a inclinação das curvas de filtração foi apenas ligeiramente maior a cada ciclo, o que indica que após o sexto ciclo, a resistência específica da torta foi quase constante, com resultados bem próximos uns dos outros, como pode ser comprovado pela Tabela 4.14.

Esta tendência de crescimento e quase estabilização apresentada na Tabela 4.14 se repetiu nos resultados de massa retida acumulada no meio filtrante como pode ser comprovado pela Figura 4.19, com, sendo praticamente constante após o quarto ciclo. A massa removida após a limpeza se manteve praticamente constante em todos os ensaios, como ocorreu com os demais tecidos.

Tabela 4.14: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaio com Poliéster tratado e rocha fina.

Ciclo	$K_2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Desvio padrão
1	$2,1 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^4$
2	$5,0 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^5$
3	$7,1 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^5$
4	$6,2 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$
5	$6,4 \cdot 10^5$	$7,3 \cdot 10^4$
6	$6,7 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$
7	$6,7 \cdot 10^5$	$1,6E+05$
8	$6,8 \cdot 10^5$	$1,2E+05$
9	$7,8 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^4$
10	$8,1 \cdot 10^5$	-

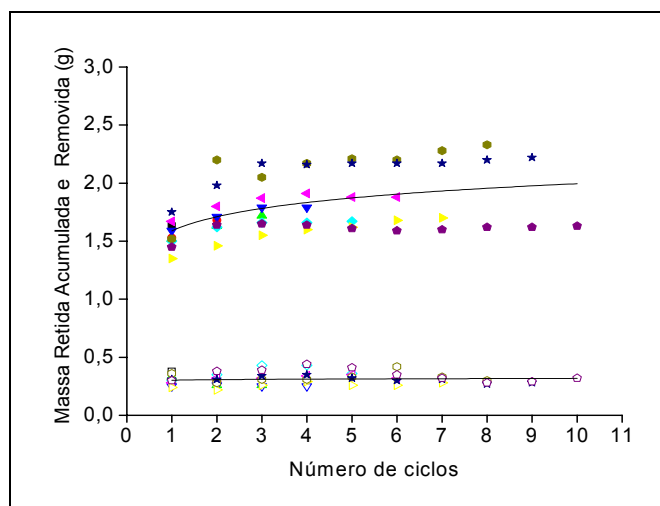


Figura 4.19: Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o Poliéster tratado e rocha fina: (!▽) Ensaio 01; (.-) Ensaio 02; (78) Ensaio 03; (BX) Ensaio 04; (AM) Ensaio 05; (ΩΞ) Ensaio 06; (βχ) Ensaio 07; (μν) Ensaio 08; (ξψ) Ensaio 09; (□□) Ensaio 10.

Como resultado deste aumento de massa retida acumulada no meio filtrante, a perda de carga residual apresentou também um incremento a cada ciclo, como ilustra a Figura 4.20, sendo que nos ciclos finais, a taxa de aumento diminuiu, indicando uma tendência a se tornar constante.

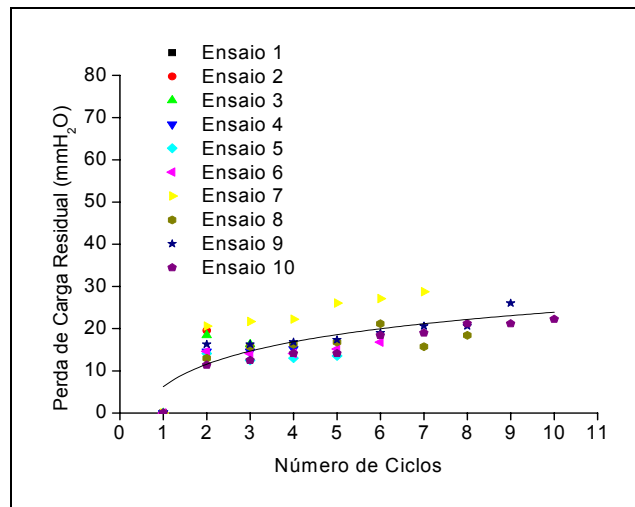


Figura 4.20 : Perfil da variação da perda de carga residual para os ensaios com Poliéster tratado e rocha fina.

Verificando o incremento da perda de carga residual com a massa retida, pode-se, através da Figura 4.21, observar que a tendência é de um aumento mais linear que o apresentado pelo Acrílico, apesar das variações dos valores, como observado também nos outros experimentos, sendo que para alguns ensaios, como para o ensaio 9 e 10, a tendência não foi clara.

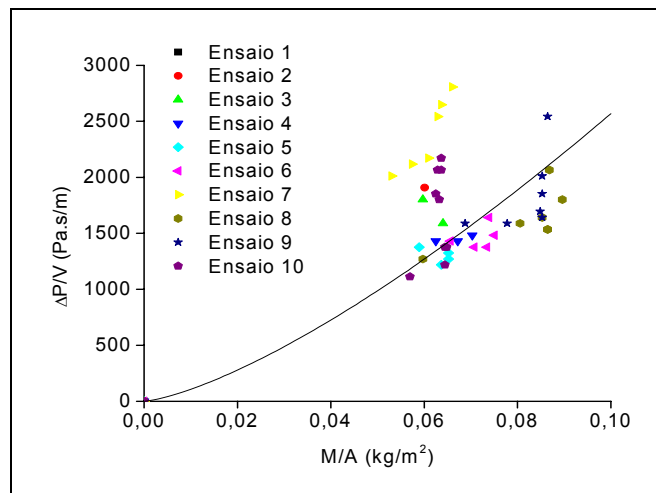


Figura 4.21: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Poliéster tratado e rocha fina.

A tendência das curvas da relação entre perda de carga residual e massa retida pode ser ajustada a uma equação potencial, expressa pela equação 4.4:

$$\frac{\Delta P}{V} = 61653 \cdot \left(\frac{M_{\text{ret}}}{A} \right)^{1,38} \quad (4.4)$$

A eficiência de remoção responsável por esta perda de carga residual pode ser visualizada na Figura 4.22. A partir da observação desta Figura, pode-se constatar que, como ocorreu nos demais experimentos, a eficiência de remoção de pó permaneceu em torno de 20%, sendo praticamente constante. Semelhante aos demais tecidos avaliados, este fato pode ser atribuído à menor espessura da torta formada.

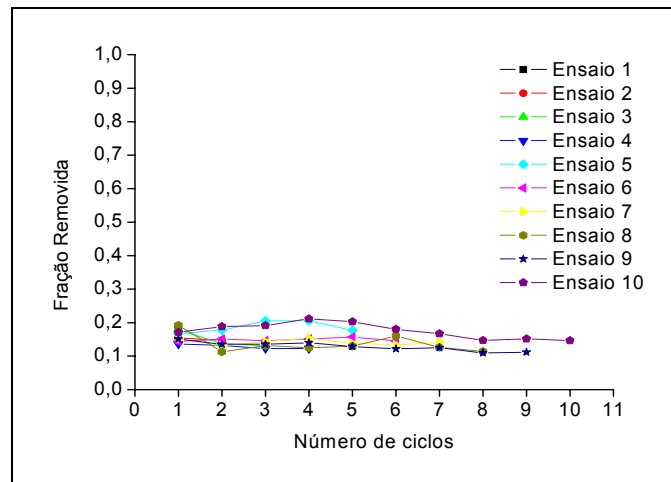


Figura 4.22: Perfil da fração removida da torta ,após a limpeza, para o Poliéster tratado e rocha fina.

Uma outra observação interessante se refere ao fato de a perda de carga residual semelhante à do Acrílico coincidir com a intensidade do formato em “S”, parecida também para ambos, o que, de acordo com a literatura, poderia ser atribuído a uma eficiência de remoção. No entanto, reafirma-se o fato de que o formato das curvas parece estar mais relacionado aos valores de perda de carga residual que aos valores de eficiência, já que as eficiências são semelhantes e a perda de carga residual não.

A penetração de partículas de rocha fina no Poliéster tratado pode ser avaliada considerando-se a Figura 4.23, que apresenta as imagens obtidas via MEV da superfície do filtro até cerca de 500 μm do interior do filtro, o que corresponde a cinco microfotografias. Quantitativamente esta análise pode ser realizada a partir da Tabela 4.15, em que é possível verificar a variação da profundidade de penetração de partículas com o número de ciclos, bem como a variação do diâmetro médio das partículas com a profundidade do tecido e com o número de ciclos. A Tabela 4.16 apresenta os valores dos desvios padrão para os dados de diâmetro de partículas.

Interface torta-ar

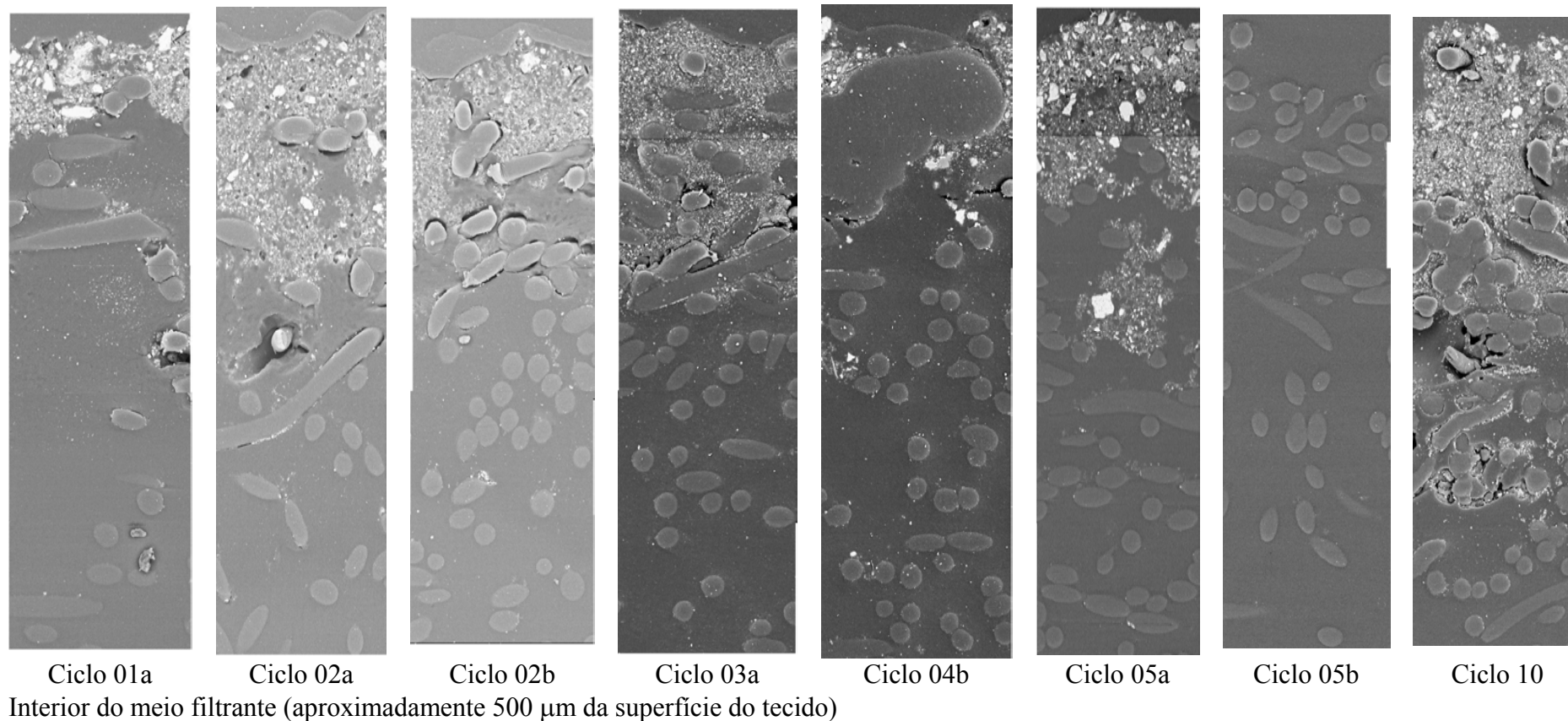


Figura 4.23: Seção transversal do poliéster tratado em diferentes ciclos

Tabela 4.15: Penetração de partículas de rocha fina no Poliéster tratado: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.

Diâmetro de partículas (μm)																				
Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				5				10			
0-107	1,403	1,090	1,213	0,947	1,289	1,097	1,451	1,230	1,353	1,195	1,598	1,358	1,206	1,499	1,066	1,335	1,084	1,326	1,209	1,536
107-214	1,017	1,119	0,844	0,963	0,000	0,905	1,330	1,163	1,215	1,029	0,963	1,103	1,121	1,273	0,848	1,178	0,883	1,110	-	1,321
214-321	-	0,921	0,932	1,152	0,957	0,685		1,036	1,152	0,977	0,785	0,932	1,085	1,254	0,693	1,268	0,906	0,910	-	1,050
321-428	0,965	-	-	1,362	-	0,628		7,725	0,748	0,934	0,865	0,992	0,567	0,587		0,733	0,950	0,817	2,080	0,962
428-535	1,984	0,842	0,522	1,211	0,958				0,959	1,053	0,983	1,027				0,635	1,022	0,947	1,029	0,858
535-642	0,592	-														0,990	0,770			1,062
642-749		0,945																		
Profundidade média (μm)	615,25				401,25				535				454,75				588,5			

Tabela 4.16: Desvio padrão do diâmetro de partículas do Poliéster tratado.

Desvio Padrão																				
Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				5				10			
0-107	1,707	1,090	1,052	1,250	1,124	1,032	1,845	1,166	1,287	1,254	0,963	1,222	0,947	1,646	0,588	1,522	1,462	1,806	1,552	1,962
107-214	0,710	0,540	0,823	0,793	0	0,598	1,776	1,149	0,990	1,003	1,028	1,058	0,984	1,239	0,407	1,100	0,726	1,505	0	1,499
214-321	0,000	0,782	0,452	0,896	0,968	0,462		0,726	0,978	0,714	1,059	0,790	0,856	1,425	0,381	1,414	0,544	0,596	0	1,118
321-428	0,347	0	0	0,541	0	0,366		4,358	0,447	0,644	1,259	0,695	0,182	0,211		0,324	0,919	0,509	2,357	0,800
428-535	0,338	0,344	0,715	0,689	0,245				0,553	0,580	0,759	0,751				0,259	0,525	0,667	0,561	1,048
535-642	0,230	-														0,517	0,316			0,670
642-749		0,510																		

Pode-se observar que a profundidade média variou entre cerca de 400 e 600 μm , aproximadamente, sem apresentar tendência definida de aumentar ou diminuir com o número de ciclos, sendo, porém, mais homogênea que as dos tecidos analisados até o momento, ou seja, alcançando uma faixa mais uniforme do tecido. Quanto ao diâmetro de partículas, verificou-se que os mesmos não apresentaram variação significativa com o número de ciclos. A variação do diâmetro com a profundidade do tecido também não foi verificada, sendo que o diâmetro pode ser considerado uniforme com a profundidade do meio filtrante. A Figura 4.24 apresenta a variação do número de partículas em cada camada do meio filtrante, para cada ciclo. Observa-se que não há tendência definida do número de partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos, como ocorreu com o diâmetro de partículas. Similarmente aos demais tecidos utilizados, nota-se que a maior parte das partículas encontrou-se nas camadas mais superficiais do tecido, tendendo a diminuir exponencialmente com a profundidade, sendo que o máximo de partículas retidas foi menor que 800.

Os valores do número de partículas no interior do poliéster tratado pode ser observado também pela Tabela 4.17, em que é apresentado também o número total de partículas encontradas por seção analisada.

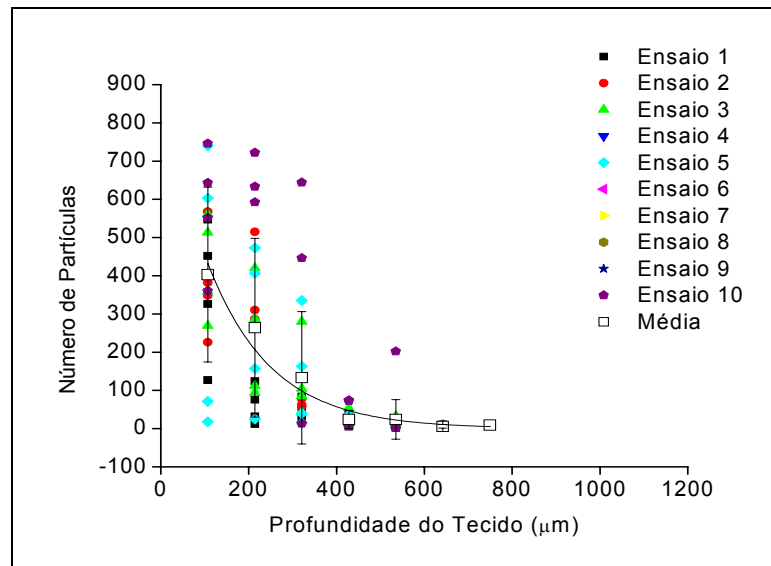


Figura 4.24: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster tratado e rocha fina.

Tabela 4.17: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Poliéster tratado e rocha fina.

Profundidade (μm)	Número de partículas																			
	Ensaio																			
	1				2				3				5				10			
0-107	547	127	326	452	226	568	382	348	561	513	358	269	71	603	18	740	552	643	2	746
107-214	32	12	124	76	0	287	310	515	94	420	287	112	157	473	25	406	592	633	0	722
214-321	0	27	56	84	57	62		78	42	280	105	85	40	335	15	163	13	446	0	644
321-428	5	0	0	41	0	35		25	12	26	54	23	9	13		36	7	73	2	74
428-535	2	10	5	12	3				33	7	21	21				7	2	11	1	202
535-642	11	0	0													4	5			11
642-749		9																		
Soma	597	185	511	665	286	952	692	966	742	1246	825	510	277	1424	58	1356	1171	1806	4	2399

4.6 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO POLIÉSTER NÃO TRATADO E ROCHA FINA (3,71 μM)

Durante o desenvolvimento das filtrações com este meio filtrante, verificou-se uma variação maior nos resultados de perfil de perda de carga, quando em comparação aos demais experimentos. Provavelmente, a ausência de tratamento implicou em uma maior heterogeneidade do meio filtrante, resultando em uma reprodutibilidade inferior. Além disso, verificou-se que a densidade de empacotamento foi maior para o tecido mais reprodutível, no caso o PP, o que pode ser imputado à melhor distribuição das fibras que ocorre durante o processo de agulhagem, que define a densidade de empacotamento do tecido. Outra consequência da ausência de tratamento foi a menor perda de carga inicial, a maior duração da primeira fase da filtração e a maior massa filtrada em cada ciclo, que pode indicar uma maior penetração de partículas e talvez também, uma eficiência de remoção de partículas deficiente por parte do meio filtrante. Os dez ciclos realizados neste tecido estão apresentados na Figura 4.25. Observa-se nesta Figura que os ensaios realizados para este tecido revelaram uma maior massa coletada nos ciclos iniciais, tornando-se próxima aos demais tecidos nos ciclos finais.

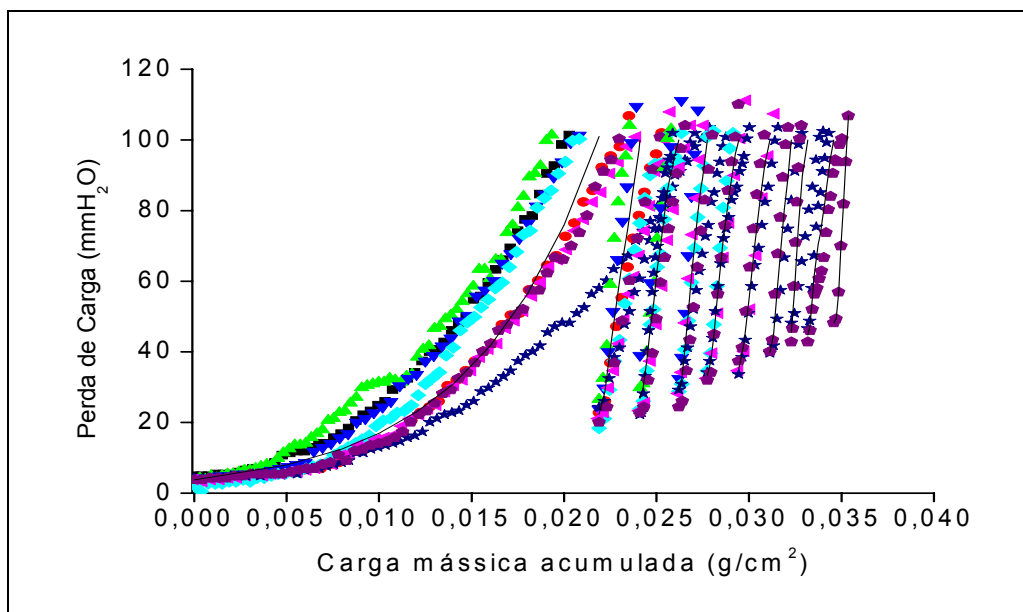


Figura 4.25: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o poliéster sem tratamento e rocha fina. (!) Ensaio 01; (.) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (A) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06; (β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

Como apontado pela literatura, no item 2.3.12, a ausência de tratamento deste tecido possibilitou um maior alojamento de partículas em seu interior, como pode ser observado na Tabela 4.18, de modo que o ponto de colmatação deste tecido foi expressivamente superior aos demais tecidos analisados até então, sendo a média dos dez ensaios igual a $10,9 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \pm 22,1 \cdot 10^{-4}$.

Verifica-se que, para o poliéster não tratado, a estabilização da massa coletada não ocorreu nos dez ciclos estudados, o que evidencia que o conjunto torta-filtro em questão não chega a apresentar saturação, ou seja, sua capacidade de retenção de partículas não foi alcançada.

O formato em “S” das curvas também parece ser pouco evidente, mas o formato aparece quando se usa uma escala adequada.

Tabela 4.18: Variação da massa filtrada média com o número de ciclos para o poliéster não tratado e rocha fina.

Ciclo	Massa (g/cm²)
1	0,0219
2	0,0022
3	0,0021
4	0,0015
5	0,0017
6	0,0017
7	0,0011
8	0,0009
9	0,0014
10	0,0008

A resistência específica da torta, apresentada pela Tabela 4.19, apresentada no ciclo 1 é relativamente baixa, se comparada aos demais experimentos. No entanto, estes valores aumentam continuamente, sem apresentar tendência a se tornarem constantes. Verifica-se que nos ciclos finais há uma certa variação dos valores, provavelmente por problemas experimentais não determinados, ou pela própria heterogeneidade do tecido.

Tabela 4.19: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Poliéster sem tratamento e rocha fina.

Ciclo	$K_2 \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Desvio padrão
1	$8,6 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
2	$2,9 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
3	$4,3 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^5$
4	$5,2 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^5$
5	$4,5 \cdot 10^5$	$7,5 \cdot 10^4$
6	$4,1 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^4$
7	$5,8 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^5$
8	$8,6 \cdot 10^5$	$7,0 \cdot 10^5$
9	$4,4 \cdot 10^5$	$3,9 \cdot 10^4$
10	$9,2 \cdot 10^5$	-

Esta tendência de crescimento da resistência específica da torta apresentada na Tabela 4.19, juntamente com os dados da Figura 4.26, ajuda a compreender os ciclos mais curtos, uma vez que a massa retida acumulada aumentou sem tendência a se tornar constante. Assim, com uma torta que ofereceu mais resistência ao escoamento e maior quantidade de massa retida, os ciclos ficaram menores e sem tendência de estabilização.

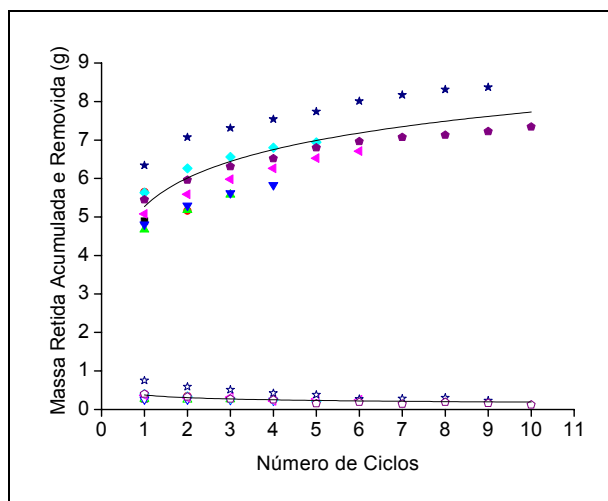


Figura 4.26 : Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o Poliéster sem tratamento e rocha fina: (!∇) Ensaio 01; (-,-) Ensaio 02; (78) Ensaio 03; (BX) Ensaio 04; (ΔM) Ensaio 05; (ΩΞ) Ensaio 06; (βχ) Ensaio 07; (μν) Ensaio 08; (ξψ) Ensaio 09; (□□) Ensaio 10.

A massa removida após a limpeza, por sua vez, apesar de ter sido maior nos ciclos iniciais, apresentou tendência decrescente com os ciclos, ao contrário do observado nos demais ensaios, indicando a degradação em sua capacidade de remoção, que pode estar relacionada à diminuição da espessura total da torta com os ciclos.

Como resultado deste aumento de massa retida acumulada no meio filtrante, a perda de carga residual apresentou também um aumento a cada ciclo, como ilustra a Figura 4.27, sendo que nos ciclos finais, esta taxa de aumento, apesar de diminuir, não apresentou tendência a se tornar constante.

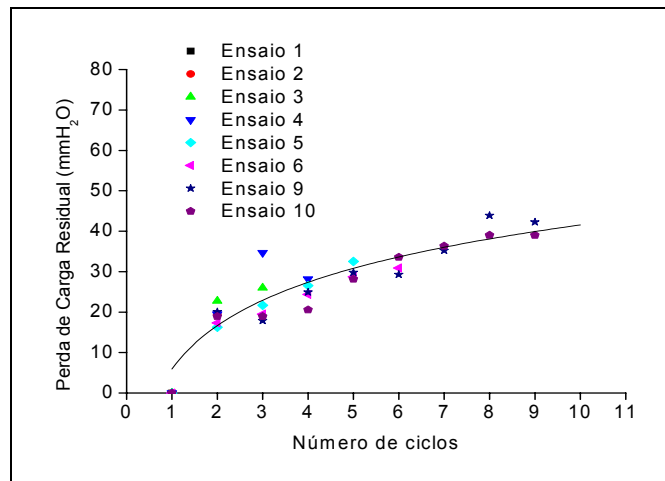


Figura 4.27 : Perfil da variação da perda de carga residual para os ensaios com Poliéster não tratado e rocha fina.

A relação observada pela semelhança de comportamento da massa retida acumulada e da perda de carga residual pode ser melhor observada na Figura 4.28.

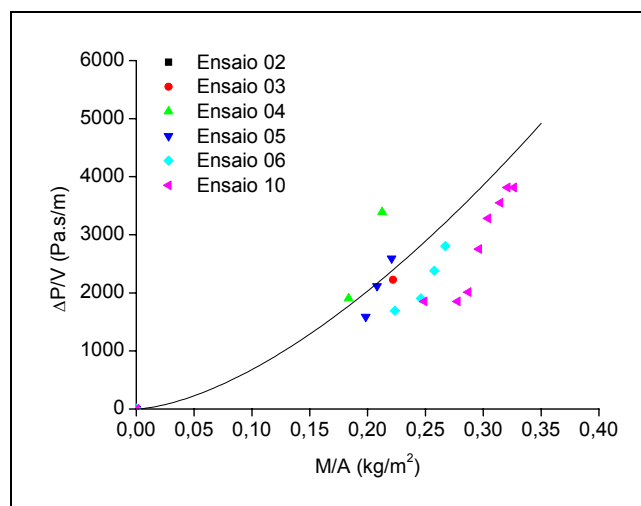


Figura 4.28: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Poliéster não tratado e rocha fina.

Verifica-se que as relações podem ser aproximadas a uma equação potencial representada pela equação 4.5:

$$\frac{\Delta P}{V} = 25841 \cdot \left(\frac{M_{\text{ret}}}{A} \right)^{1,58} \quad (4.5)$$

A eficiência de remoção responsável por esta perda de carga residual pode ser visualizada na Figura 4.29. A partir da observação da mesma pode-se constatar que a eficiência de remoção de pó permaneceu abaixo de 10%, durante os ensaios, sendo ligeiramente superior nos ciclos iniciais. Este comportamento ratifica a degradação da eficiência de remoção comentada na análise da Figura 4.26.

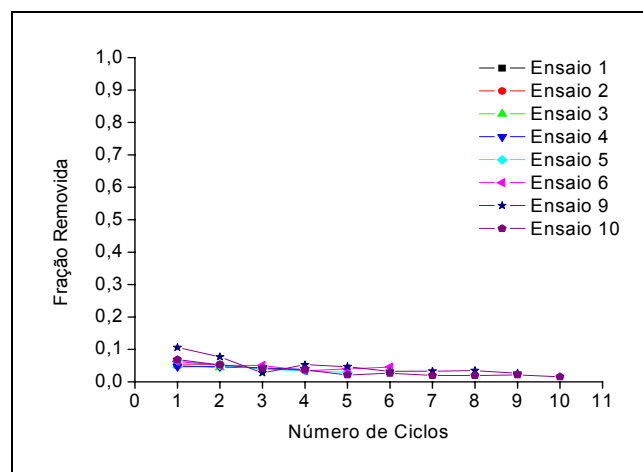


Figura 4.29: Perfil da fração de massa removida da torta, após a limpeza para o Poliéster não tratado e rocha fina.

A penetração de partículas no Poliéster sem tratamento pode ser avaliada observando-se a Figura 4.30, em que se verifica algumas colunas de alguns ciclos analisados em MEV. Observa-se a menor densidade de fibras deste tecido e a maior densidade de partículas em seu interior. Pela Tabela 4.20, é possível verificar a variação da profundidade de penetração de partículas com o número de ciclos, assim como a variação do diâmetro médio das partículas com a profundidade do tecido e com o número de ciclos. A Tabela 4.21 apresenta os desvios padrão destes dados.

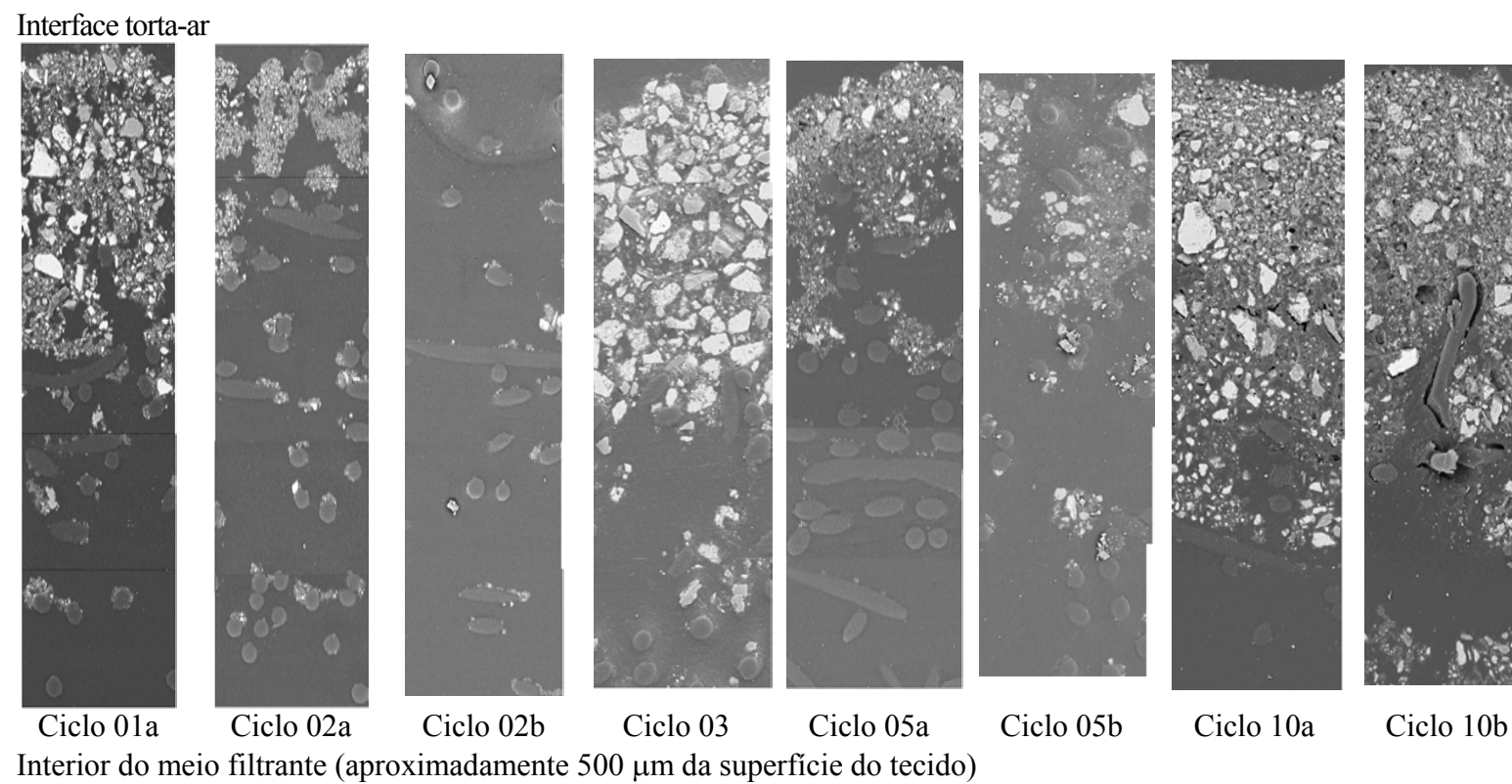


Figura 4.30: Seção transversal do poliéster não tratado em diferentes ciclos

Tabela 4.20: Penetração de partículas de rocha fina no Poliéster não tratado: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.

Profundidade (μm)	Diâmetro de partículas (μm)																			
	1					2				3				5				10		
0-107	1,290	1,823	2,837	2,531	2,801	1,504	0,979	1,440	1,835	2,565	7,261	1,557	1,375	1,894	1,505	1,691	1,628	1,510	1,393	1,792
107-214	1,283	1,755	3,092	2,774	0,854	1,562	1,085	1,612	1,861	2,442	1,350	1,197	1,587	2,068	1,325	1,700	1,598	1,593	1,346	1,749
214-321	1,005	1,347	3,437	2,080	1,237	1,215	1,065	1,257	2,130	2,688	0,986	1,189	2,157	1,980	1,099	1,568	1,747	1,571	1,161	1,604
321-428	0,889	1,035	3,723	2,196	0,859	1,079	0,982	1,220	2,654	1,923	0,826	0,992	2,056	1,569	1,230	1,204	1,715	1,346	1,442	1,605
428-535	0,992	1,061	3,432	1,890	0,879	1,354	0,977	1,354	2,200	2,002	0,848	0,884	1,526	1,067	1,144	1,234	1,200	1,520	1,141	2,188
535-642	3,213	0,768	2,561	1,316	0,811	1,330	0,838	1,000	1,503	1,242	0,853	0,923	1,833	5,421	1,476	0,692	1,143	1,517	1,173	1,165
642-749	1,439	0,874	2,218	1,773	0,000	0,962	0,826	0,910			1,001	0,722	1,161	7,788	1,026	0,777	0,894	2,177	0,972	2,539
749-856	0,000	1,018	-	-	0,920	0,757	0,879	0,704			1,139	0,780	0,990	2,562	1,317	0,825	1,294	1,080	1,207	1,008
856-963	0,680	1,083	1,767	2,076	0,743	0,816	0,881	0,925					1,046	0,640			1,200	1,802	1,411	1,147
963-1070	0,953				0,728	0,641	0,845						0,932	-			0,865	0,844	0,865	3,290
1070-1177						0,854	0,748							0,967			1,220	0,582	0,767	1,751
1177-1284						0,765											0,661		0,834	0,938
1284-1391						0,830											0,744			1,222
1391-1498																	0,679			0,837
1498-1605																	0,885			
Profundidade média (μm)	989,75				1.150,25				749				989,75				1.391			

Tabela 4.21: Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha fina em Poliéster sem tratamento.

Profundidade (μm)	Desvio Padrão																			
	1				2				3				5				10			
0-107	1,518	2,188	3,252	2,623	3,056	1,635	0,979	1,706	2,420	3,314	4,975	1,857	2,101	2,356	1,849	2,137	1,719	1,549	1,849	2,874
107-214	1,933	2,084	3,431	3,617	0,580	1,756	1,085	2,003	2,945	3,516	1,618	1,309	2,037	2,645	1,725	2,125	2,106	2,011	1,725	2,715
214-321	1,676	1,394	4,204	2,728	1,915	1,129	1,065	1,312	2,986	4,072	0,701	1,212	1,969	1,672	1,069	2,360	2,420	2,048	1,069	2,368
321-428	0,611	1,264	4,693	2,982	0,592	0,890	0,982	1,043	4,352	2,882	0,643	0,969	2,303	2,448	1,337	1,070	1,942	1,399	1,337	2,312
428-535	0,661	0,688	4,573	2,845	0,683	0,000	0,977	1,880	4,433	2,556	0,543	0,680	1,097	1,037	0,860	1,696	0,745	1,692	0,860	3,265
535-642	4,180	0,486	3,468	0,747	0,386	1,699	0,838	0,710	0,829	1,215	0,526	0,540	2,099	3,735	3,189	0,453	0,800	1,745	3,189	0,983
642-749	0,682	0,509	3,392	1,753	0,000	0,839	0,826	0,496			0,746	0,260	1,522	1,777	0,678	0,299	0,649	2,731	0,678	2,589
749-856	0,000	0,663	0,000	0,000	0,642	0,536	0,879	0,311			0,785	0,409	0,666	3,600	0,962	0,339	1,525	0,574	0,962	0,912
856-963	0,275	0,488	3,181	1,535	0,496	0,475	0,881	0,497					0,863	0,286			1,029	2,153	0,000	1,021
963-1070	0,459				0,377	0,160	0,845						0,489	0,000			0,524	0,443	2,137	3,056
1070-1177						0,480	0,748							0,373			1,706	0,122	2,125	3,153
1177-1284						0,431											0,306		2,360	0,771
1284-1391						0,787											0,577			1,259
1391-1498																	0,201			0,772
1498-1605																	0,447			

Pode-se observar na Tabela 4.20, que a profundidade média variou entre cerca de 750 e 1.400 μm , aproximadamente, sem que se possa concluir que haja uma tendência definida de aumentar ou diminuir com o número de ciclos. Quanto ao diâmetro de partículas, verificou-se que não houve tendência de aumentar ou diminuir com o número de ciclos ou com a profundidade do tecido.

Pela Figura 4.31 observa-se que não houve tendência definida do número de partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos, a exemplo do que ocorreu com o diâmetro de partículas. Novamente pode-se notar uma maior concentração de partículas nas camadas mais externas do meio filtrante, tendendo a diminuir exponencialmente com a profundidade, sendo que o máximo de partículas retidas foi menor que 1.100.

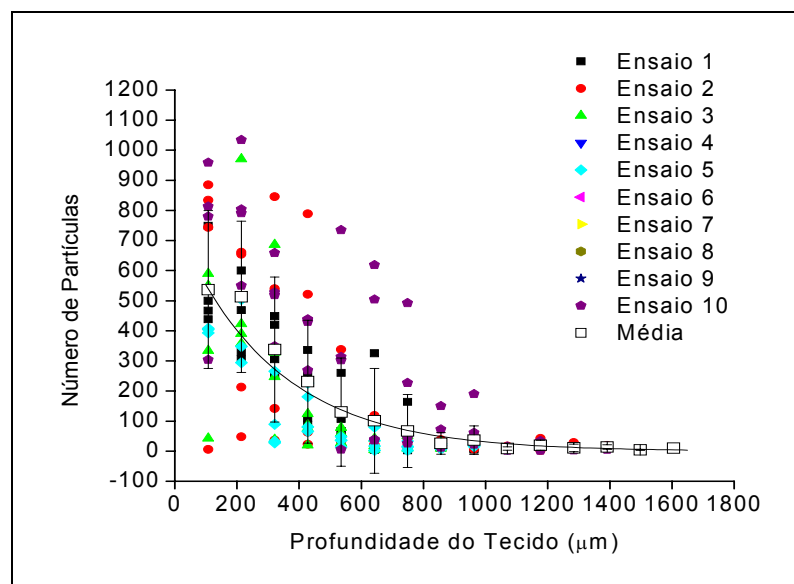


Figura 4.31: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster não tratado e rocha fina.

Os valores do número de partículas no interior do poliéster não tratado podem ser observados pela Tabela 4.22, apresentando-se também o número total de partículas coletadas em cada coluna analisada.

Tabela 4.22: Valores do número de partículas retidas após a limpeza em cada camada do meio filtrante, para o Poliéster não tratado e rocha fina.

Número de partículas																				
Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				5				10			
0-107	500	749	467	438	6	834	885	744	550	334	43	590	393	538	404	408	780	959	813	304
107-214	305	600	469	330	48	654	213	661	423	358	390	971	294	348	508	504	791	1034	804	550
214-321	420	449	305	252	37	846	142	540	328	247	38	686	28	32	89	265	528	659	349	519
321-428	336	87	260	111	23	521	63	789	20	76	87	124	66	226	81	181	430	269	436	438
428-535	107	66	260	67	44	0	31	338	26	78	59	27	14	48	36	36	6	302	735	313
535-642	4	23	325	11	23	119	21	85	4	10	42	17	35	3	80	17	39	504	619	36
642-749	3	41	164	9	-	40	20	11			51	9	13	3	34	16	26	227	492	44
749-856	-	11	-	-	32	38	9	29			9	29	8	8	26	19	72	14	150	12
856-963	16	9	50	5	15	47	7	21					20	15			22	61	190	35
963-1070	9				10	13	17						6	-			13	2	15	4
1070-1177						43	2							8			24	2	34	25
1177-1284						29											4		6	3
1284-1391						19											17			5
1391-1498																	3			5
1498-1605																	10			
Soma	1700	2035	2300	1223	238	3203	1410	3218	1351	1103	719	2453	877	1229	1258	1446	2765	4033	4643	2293

4.7 COMPARAÇÃO ENTRE OS MEIOS FILTRANTES E ROCHA FINA

Uma comparação dos dez ciclos realizados no Ensaio 10 dos quatro tecidos analisados está apresentada na Figura 4.32, o que possibilita uma melhor visualização dos resultados para as discussões apresentadas até o momento.

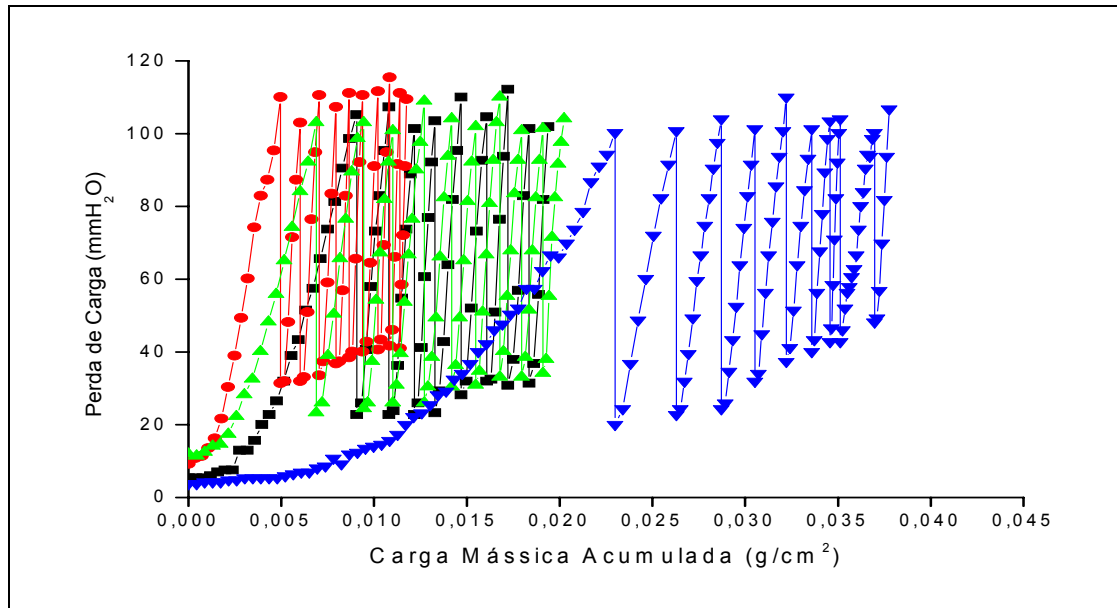


Figura 4.32: Gráfico comparativo dos dez ciclos do Ensaio 10, em termos de carga mássica acumulada, para os diferentes tecidos. (!) Acrílico; (.) Polipropileno; (7) Poliéster tratado; (B) Poliéster não tratado.

A partir da Figura 4.32, é possível verificar mais claramente as diferenças entre as filtrações realizadas nos diferentes meios filtrantes. O Poliéster não tratado, como comentado anteriormente, apresentou o maior período de filtração interna, apontado pelo seu maior ponto de colmatação bem como uma maior massa coletada na filtração, como pode ser verificado pela Tabela 4.23. O ponto de colmatação obtido para cada filtro obedeceu à mesma ordem de variação, sendo menor para os tecidos que apresentaram menores porosidade e permeabilidade. Este fato se deve ao menor espaço interno para acomodar as partículas, e mostra que a torta é formada mais rapidamente nos tecidos com permeabilidade e porosidade menores. Em princípio, um tecido com um ponto de colmatação mais alto seria mais adequado por conferir menor perda de carga. No entanto, esta característica da filtração deve ser analisada juntamente com as

demais, pois como se vê, o tecido não tratado apresentou maior ponto de colmatação e nem por isso se mostrará o mais adequado.

Tabela 4.23: Ponto de colmatação médio determinado para cada os ensaios de cada tecido estudado.

Tecido	Ponto de colmatação (g/cm²)
AC	0,0031
PP	0,0012
PT	0,0025
PNT	0,0109

Porém, apesar da ausência de tratamento resultar em um maior ciclo inicial, a duração dos ciclos diminuiu até atingir valores inferiores aos demais tecidos.

No outro extremo, nota-se pela Figura 4.32, que o Polipropileno apresentou os ciclos mais curtos, sendo seu período de filtração interna praticamente desprezível se comparado aos demais tecidos. Até o presente momento da discussão, pode-se atribuir à menor permeabilidade e porosidade deste meio filtrante a contribuição para este padrão de comportamento. Do mesmo modo, observa-se também a semelhança das curvas de filtração entre o Acrílico e o Poliéster tratado, cujos valores de permeabilidade e porosidade do tecido são bastante próximos, o que pode estar associado a este comportamento semelhante.

Além de se considerar as propriedades dos tecidos sobre as curvas de filtração, observou-se que a torta formada também influenciou na duração dos ciclos, uma vez que a resistência específica da mesma foi diferente para cada tecido e variou de forma peculiar com os ciclos, como pode ser observado pela Figura 4.33. Verifica-se, portanto, que características dos meios filtrantes influenciaram a formação diferenciada das tortas. No entanto, com as ferramentas disponíveis neste trabalho não foi possível esclarecer esta relação.

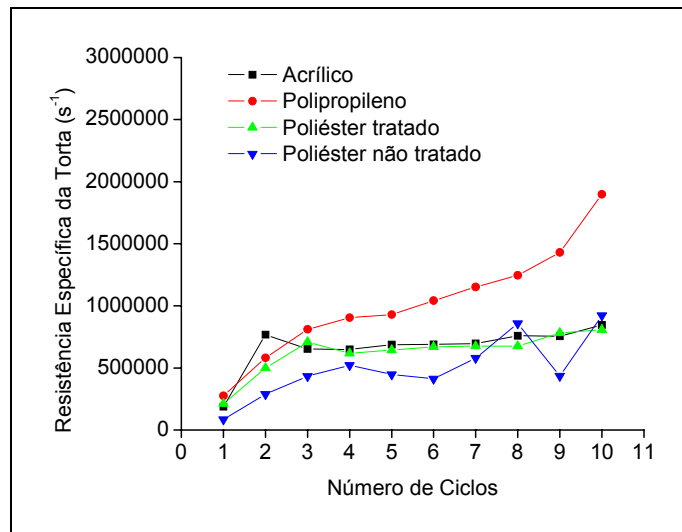


Figura 4.33: Curvas comparativas da resistência específica da torta média para os tecidos.

Uma constatação interessante a partir da Figura 4.33 se refere à tendência do comportamento das resistências específicas da torta e do comportamento da permeabilidade e da porosidade dos meios filtrantes. Verificou-se que a torta formada apresentou características semelhantes ao tecido base, parecendo reproduzir as características do filtro.

A diferença na massa coletada em cada tecido refletiu-se nos valores de massa removida e retida acumulada nos ciclos, apresentados na Figura 4.34.

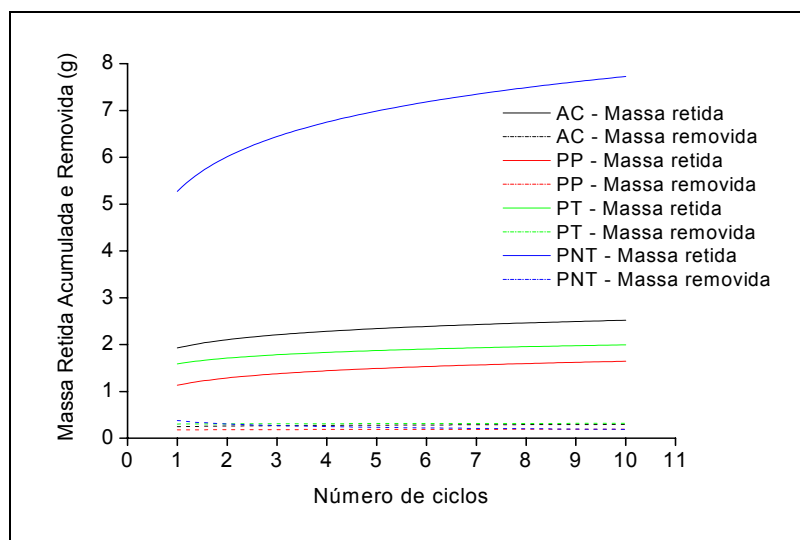


Figura 4.34: Massa de material pulverulento removida pela limpeza nos tecidos.

Nesta figura, as curvas representam as curvas médias dos experimentos anteriormente realizados. Verifica-se que, exceto para o poliéster não tratado (PNT), a massa removida apresentou um comportamento aproximadamente constante nos ciclos estudados, para todos os tecidos tratados. Para o PNT, os valores iniciais de massa removida foram muito maiores que aqueles dos demais experimentos, mas houve uma tendência nítida da massa removida diminuir a cada ciclo, aproximando-se dos valores obtidos para os outros testes, nos últimos ciclos, como pode ser observado na Tabela 4.24.

O tecido tratado que apresentou maior massa removida foi o que possuía maior permeabilidade, ou seja, o poliéster tratado, seguido pelo acrílico e pelo polipropileno. Esta seqüência corresponde à ordem decrescente de permeabilidade, devendo-se considerar que os tecidos que removeram mais foram aqueles que apresentaram espessuras maiores de torta, ratificando os resultados de KANOKA et al. (2001).

Tabela 4.24: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os tecidos analisados.

Ciclo	Massa Removida (g)				Massa Retida Acumulada (g)			
	AC	PP	PT	PNT	AC	PP	PT	PNT
1	0,24	0,16	0,30	0,40	1,89	1,1	1,45	5,45
2	0,23	0,15	0,38	0,33	2,09	1,22	1,64	5,96
3	0,21	0,13	0,39	0,27	2,22	1,35	1,65	6,31
4	0,22	0,14	0,44	0,25	2,32	1,44	1,64	6,52
5	0,28	0,14	0,41	0,15	2,34	1,48	1,61	6,80
6	0,25	0,15	0,35	0,19	2,36	1,52	1,59	6,96
7	0,28	0,16	0,32	0,14	2,38	1,57	1,60	7,07
8	0,28	0,15	0,28	0,19	2,42	1,58	1,62	7,13
9	0,27	0,14	0,29	0,16	2,52	1,58	1,62	7,22
10	0,25	0,13	0,32	0,12	2,67	1,59	1,63	7,34

O comportamento da massa retida acumulada nos tecidos após a limpeza apresentado na Tabela 4.24, revelou um perfil crescente nos ciclos iniciais seguido de uma tendência a se manter constante nos tecidos tratados. Como esperado, o tecido sem tratamento reteve maior quantidade de massa, seguido pelo Acrílico, Poliéster tratado e Poliéster não tratado.

Este comportamento confere com a ordem de permeabilidade dos meios filtrantes. Desta forma, após a massa retida acumulada e a massa removida tornarem-se

praticamente constantes nos tecidos tratados, toda a massa coletada em cada filtração era removida totalmente na limpeza.

No caso do poliéster sem tratamento, houve um acúmulo de massa (retida) ciclo a ciclo, indicado pela tendência crescente da curva do material filtrado, o que indica que o conjunto torta-tecido ainda tinha capacidade ou espaço para acomodar partículas, de modo que seria necessário realizar mais ciclos para afirmar que este conjunto poderia vir a saturar-se. Isto quer dizer que, nos tecidos sem tratamento, alguma parcela da massa coletada permanecia retida no meio filtrante ou na superfície, após a limpeza.

Este fato corrobora com os resultados apresentados na literatura, sendo consequência da maior abertura da superfície do tecido, permitindo assim, a penetração de uma maior quantidade de material pulverulento, ratificada ao se comparar as microfotografias realizadas e apresentadas na Figura 4.1. Tal ilustração possibilitou comparar-se os tecidos e constatar que o tecido tratado com menor abertura superficial, no caso o polipropileno, foi também o que apresentou a menor massa retida em todos os ciclos, sendo seguido pelo poliéster e posteriormente pelo Acrílico. Estes resultados reafirmam as observações de MAUSCHITZ et al. (2004), que afirmaram que o tecido mais poroso apresentou a maior massa retida.

Não se pode deixar de considerar ainda que existe uma maior retenção da torta na camada superficial do tecido sem tratamento, provocada pela “captura” da mesma pelos pespontados presentes na interface torta-tecido, como observado no trabalho de CLARK (2001), que dificulta a remoção tende a ser menor sempre para estes tecidos.

Apesar das análises das massas retida acumulada e removida indicarem um processo de saturação do conjunto torta-tecido, sendo a massa retida menor inicialmente e aumentando ciclo a ciclo, até tornar-se constante, analisando o número de partículas com o número de ciclos verificou-se que não houve uma tendência destes dados variarem do ciclo inicial para o final, conforme pode ser observado na Figura 4.35. Esta curiosa constatação traz uma nova informação interessante, uma vez que até então se considerava que o interior tecido era saturado ou colmatava com o acúmulo de partículas. Porém para o PNT não se pode afirmar que o número de partículas não variou ciclo a ciclo, pois o ensaio 10 apresentou valores maiores. No entanto, este comportamento pode tanto expressar uma tendência quanto um caso isolado.

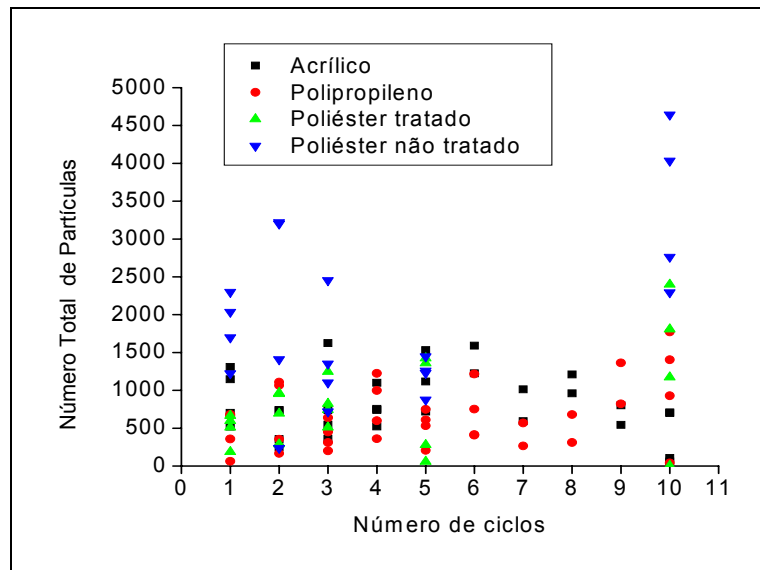


Figura 4.35: Total de partículas coletadas em cada coluna analisada, por ciclo.

O que se observa, de modo geral, é que os pontos ilustram o fato de que o acúmulo de massa indicado pela massa retida possa estar ocorrendo exclusivamente na superfície do tecido, em detrimento do acúmulo no interior do meio filtrante, como se pensava até então. Assim, a saturação seria um fenômeno mais de superfície que interno, sendo que, quando se fala em saturação do conjunto torta-tecido, essa saturação pode estar ocorrendo apenas na torta, ou seja, a massa retida adicional fica retida apenas na superfície do tecido ou na torta remanescente, e não no seio do filtro. Deste modo, com as constatações apresentadas, pode-se concluir que apesar do número de partículas que penetraram no tecido tender a ser o mesmo desde o primeiro ciclo, e aumentar para cada tecido conforme a duração da filtração interna, estes valores não tenderam a aumentar, como ocorreu com a massa retida com o passar dos ciclos. Isto indica que a intensidade de penetração seja um fenômeno definido logo no primeiro ciclo, para os tecidos tratados.

Além disso, a Figura 4.35 mostra que o Polipropileno apresentou o menor número de partículas coletadas no interior do tecido, por ciclo. O Poliéster não tratado, por sua vez, apresentou um número superior de partículas coletadas. Esta constatação vem confirmar as suspeitas de que o maior ponto de colmatação se reflete em um maior número de partículas arranjado internamente ao filtro, e vice-versa.

De qualquer forma, independente da saturação ocorrer no interior ou na superfície do tecido, a perda de carga residual resultante em cada tecido tendeu a

acompanhar o comportamento qualitativo da massa retida, como se pode verificar pela Figura 4.36.

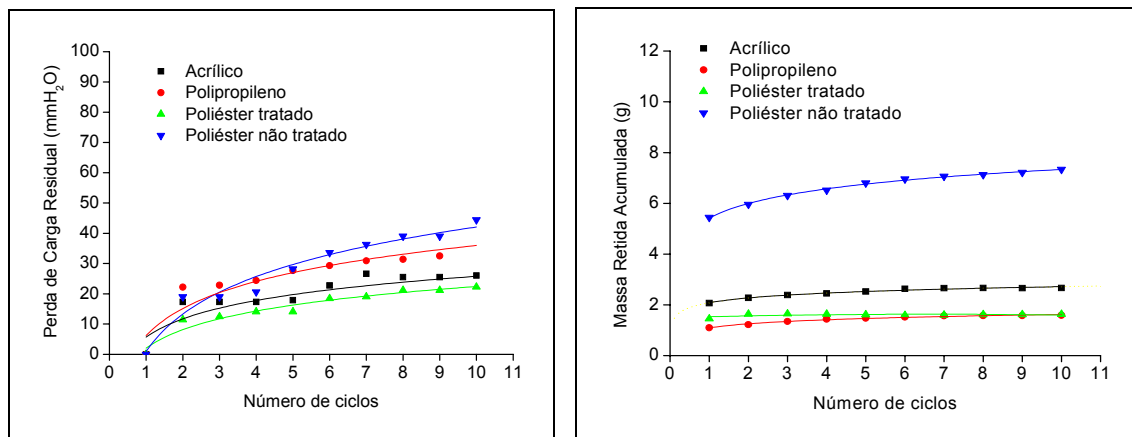


Figura 4.36: Gráfico comparativo do Ensaio 10 de cada tecido, para a perda de carga residual e massa retida acumulada, para diferentes tecidos.

Por meio da Figura 4.36, observou-se que apesar de inicialmente a perda de carga residual no experimento com poliéster sem tratamento não apresentar o maior valor, rapidamente este ultrapassa os valores de perda de carga residual dos demais tecidos tratados. Verifica-se também, para este tecido, que não houve tendência do perfil de perda de carga residual se tornar constante durante os dez ensaios realizados. Para os demais tecidos tratados filtrando, verifica-se que a taxa de aumento da perda de carga é inferior, sendo mais pronunciada para o Polipropileno, seguida do Acrílico e do Poliéster tratado, como pode ser observado na Tabela 4.25.

Tabela 4.25: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os tecidos analisados.

Ciclo	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)			
	AC	PP	PT	PNT
1	0	0	0	0
2	17,35	22,23	11,39	18,97
3	17,35	22,77	12,47	18,97
4	17,35	24,4	14,10	20,60
5	17,89	27,65	14,10	28,19
6	22,77	29,28	18,43	33,61
7	26,57	30,9	18,97	36,32
8	25,48	31,45	21,14	39,04
9	25,48	32,53	21,14	39,04
10	26,02	35,29	22,23	44,46

Como o primeiro ciclo é realizado com um tecido limpo, admitiu-se que o valor da perda de carga residual em todos esses casos era igual a zero. O comportamento semelhante de ambas as características de filtração ratifica o fato de que as partículas acumuladas no meio e a perda de carga resultante estão de alguma forma associadas. Esta associação pode ser percebida pela Figura 4.37.

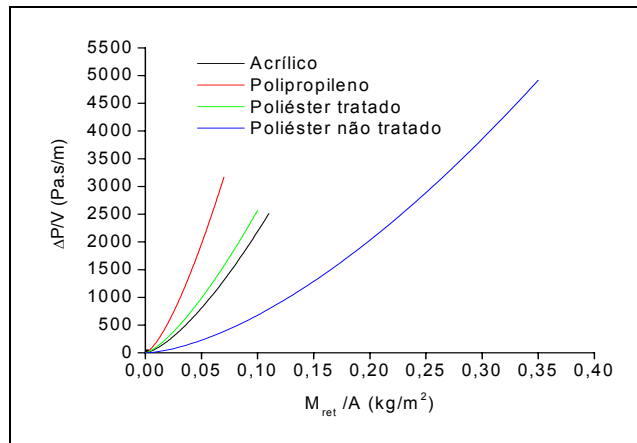


Figura 4.37: Variação da perda de carga residual com a massa retida em cada ciclo de filtração para os tecidos analisados.

Verifica-se que para o Polipropileno houve um incremento maior da perda de carga residual para uma massa semelhante aos demais tecidos, com o número de ciclos. No outro extremo, verifica-se que para o poliéster não tratado, os efeitos do acúmulo de massa são menores sobre a perda de carga residual. O Poliéster tratado, por sua vez, apresentou um comportamento intermediário entre o PP e o AC, sendo, porém, muito próximo do Acrílico.

O Polipropileno apresentou os maiores valores de perda de carga residual entre os tecidos tratados, mas, no entanto, a massa retida foi a menor dentre os mesmos. Este fato indicou, além da menor capacidade de retenção de partículas do Polipropileno, comprovada pelo menor número de partículas coletadas, que a perda de carga residual não é apenas consequência do acúmulo de material no interior do filtro, mas sim da associação deste acúmulo com as características do filtro. Deste modo, as características do tecido acabam por exercer influência não apenas nos ciclos iniciais, mas também no desempenho global do tecido durante toda sua vida útil.

Nos estudos de ELLENBECKER e LEITH (1981) com tecidos não trançados, a fração limpa diminuía a cada ciclo. Porém, como pôde ser observado na Figura 4.38,

as curvas dos tecidos tratados apresentaram alguma variação em torno de uma constante, sem apresentarem uma tendência definida, sendo que em alguns ensaios esta aumentou e em outros diminuiu, podendo-se considerar que, de modo geral, os valores foram constantes, o que era esperado, uma vez que, para estes tecidos, a massa retida e removida tenderam a se tornarem-se constantes.

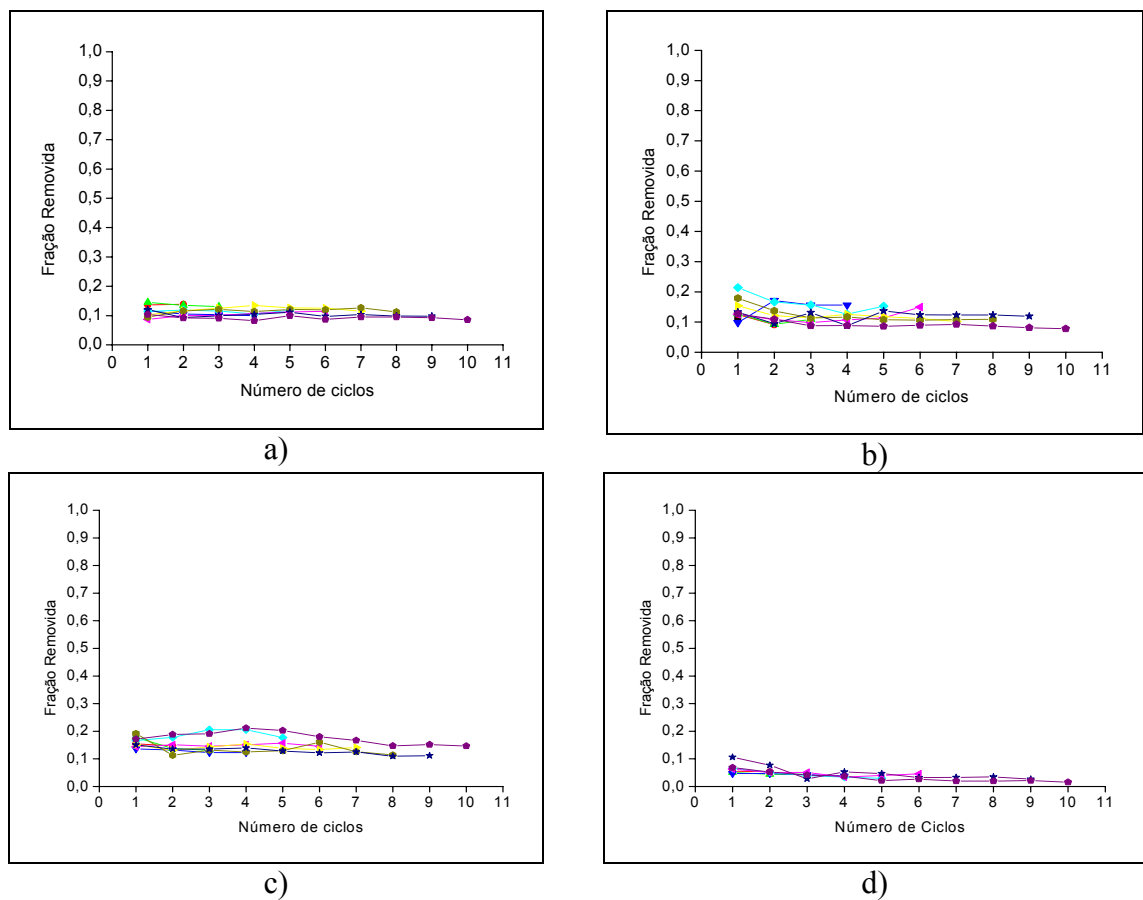


Figura 4.38: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para: a) AC e rocha; b) PP e rocha; c) PT e rocha; d) PNT e rocha. (!) Ensaio 01; (,) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (A) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06; (β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (\square) Ensaio 10.

Este fato vem reafirmar as conclusões anteriores de que, após a saturação do conjunto torta-tecido, a massa que se depositou no filtro durante cada filtração era completamente removida. Já para o tecido não tratado, verificou-se que a eficiência de limpeza foi maior para os ciclos iniciais, tornando-se muito próxima de zero para os ciclos finais.

Analisando-se o caso particular do Acrílico e do Polipropileno, cujos resultados foram os mais discrepantes entre si, têm-se algumas observações. A fração removida nas limpezas do Polipropileno foi superior à do Acrílico, apesar da espessura da torta ter sido menor, o que pode ser resultado do tratamento mais vigoroso do PP, demonstrado por sua superfície mais fundida, resultando em uma superfície mais lisa e mais fechada, promovendo uma filtração mais superficial. Apesar dessa menor massa retida, a perda de carga residual do PP foi superior à do AC e a massa retida inferior. Assim, por estas características da filtração de cada meio, pode-se deduzir que a perda de carga residual deixa de ser um parâmetro adequado para avaliar a eficiência de limpeza quando se compara meios filtrantes diferentes.

Fazendo-se uma análise da estrutura de cada tecido, a partir da caracterização realizada no início deste trabalho, verifica-se que, para o caso particular do Polipropileno e Acrílico, o diâmetro de fibras dificilmente estaria interferindo nos resultados, pois ambos apresentam valores muito próximos. No entanto, a permeabilidade e a porosidade do Polipropileno são inferiores às do Acrílico. Desta forma, pode ser que as partículas capturadas entre as fibras exerçam um maior efeito sobre os tecidos com maior resistência à passagem do ar, bloqueando mais rapidamente seus interstícios. Esta constatação pode explicar a maior perda de carga residual provocada por uma menor massa retida verificada nos ensaios com o polipropileno em comparação com o acrílico para os experimentos com a rocha fina.

Os ensaios realizados na execução deste trabalho revelaram que a remoção da torta ocorreu aos pedaços, caracterizando o fenômeno da limpeza em blocos. No entanto, as partes removidas foram muito pequenas, uma vez que as tortas possuíam pouca espessura, de modo que não puderam ser quantificadas, nem tampouco se pôde realizar uma comparação entre os tecidos. Para levantamento de tal característica, seria necessário realizar ensaios que permitissem a formação de uma torta mais espessa, o que descaracterizaria os estudos aqui realizados.

A Figura 4.39 revela que a maior parte das partículas ficou retida nas primeiras camadas dos meios filtrantes, independente do tipo do filtro. Porém, exceto para o tecido sem tratamento, a média do número de partículas coletadas em cada camada foi bastante próximo, sendo variável apenas a profundidade de penetração. Já para o tecido

sem tratamento, o número de partículas foi superior aos demais tecidos, em toda a profundidade do tecido, indicando um maior acúmulo de partículas em seu interior.

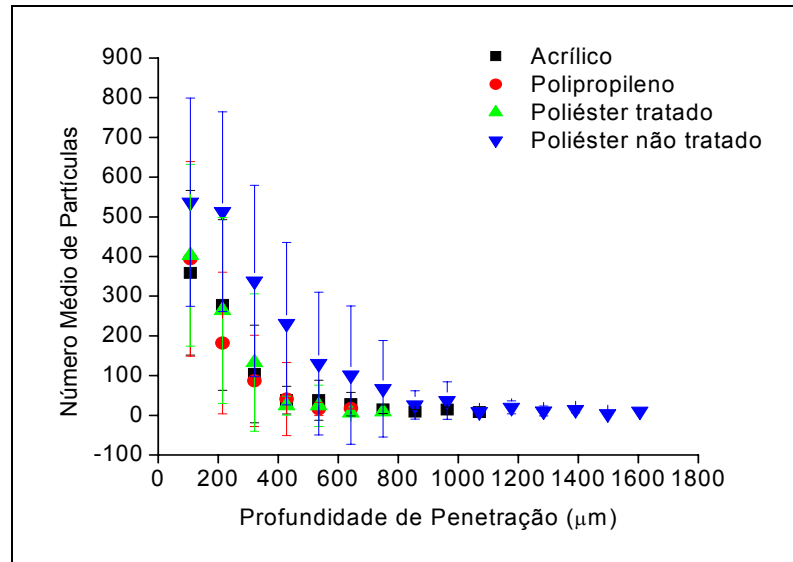


Figura 4.39: Tendência da variação do número médio de partículas com a profundidade do tecido.

Pelos valores do desvio padrão, verifica-se que na primeira camada, o número de partículas foi significativamente variável, mesmo para experimentos com o mesmo tecido, evidenciando a heterogeneidade do processo e também como resultado da limpeza por blocos. Observa-se também que o número de partículas coletadas diminui com a profundidade do tecido, tendendo a um comportamento exponencial, conforme descrito por THOMAS et al. (2001). No entanto, verifica-se que em todos os tecidos o comportamento do número de partículas obedece a esta mesma tendência exponencial.

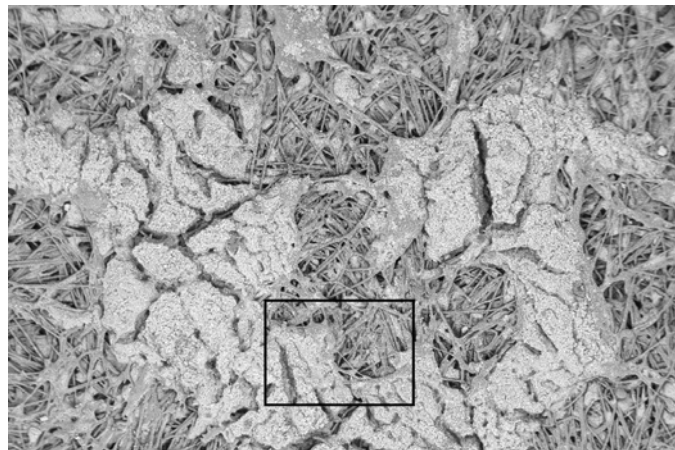
Apesar do Acrílico apresentar maior massa retida em relação ao Polipropileno, o número de partículas depositada em ambos foi próximo, o que indica que o acúmulo provavelmente ocorreu na superfície do filtro, e não em seu interior. Este fato é interessante, pois até então imaginava-se que este acúmulo fosse interno. Porém este comportamento pode ser esclarecido quando se observa como o tratamento interferiu na intensidade de penetração, uma vez que o PP apresentou a superfície com maior quantidade de pontos quentes (ou “hot spots”) que o AC. Deste modo, com a superfície apresentando fibras mais fundidas, ocorreu um bloqueio à entrada de partículas neste meio filtrante, diminuindo a sua profundidade de penetração, e verificou-se também, como comentado anteriormente, que a remoção foi mais eficiente.

Pode ser também que, por causa da menor permeabilidade e porosidade do Polipropileno, as partículas retidas na camada mais superficial provocaram a colmatação mais rápida do meio filtrante, impedindo que outras partículas penetrassem mais profundamente, o que resultou em sua menor massa retida e maior perda de carga residual. Assim, pode-se atribuir a menor profundidade de penetração apresentada por este tecido não apenas ao tipo de tratamento sofrido e à sua menor abertura superficial, mas também à acomodação das partículas no seu interior. Deste modo não se pode deixar de considerar os efeitos de interação entre as partículas e o meio filtrante com suas diferentes permeabilidade e porosidade, que permite uma acomodação diferente de partículas em cada tecido.

O Poliéster tratado, apesar de apresentar todas as demais características analisadas até então muito semelhantes às do Acrílico, inclusive quanto ao número de partículas coletadas por coluna analisada, apresentou uma profundidade de penetração inferior. Pode ser que nestes dois casos em especial, o tratamento superficial que conferiu ao PT uma superfície mais fechada, também tenha interferido na profundidade de penetração de partículas. A observação das fotos da Figura 4.40 sugere que a remoção de torta ocorreu preferencialmente nos pontos onde não havia os “hot spots”, o que é razoável, uma vez que o ar em contrafluxo não tem como atravessar as fibras fundidas.

Desta forma, além de conferir uma superfície mais lisa, que diminui a adesão torta-filtro, essas fibras fundidas pelo tratamento colaboram também no sentido de concentrar o fluxo de ar, resultando em maiores velocidades através da torta e removendo o material depositado mais efetivamente, e no caso do PT, impedir que mais partículas penetrem mais profundamente no tecido.

Através destes resultados, não restam dúvidas sobre a eficiência do tratamento superficial em minimizar a penetração de partículas no interior dos meios filtrantes. Desse modo, foi possível verificar a penetração de um número maior de partículas e mais profundamente no tecido sem tratamento.



a)



b)

Figura 4.40: Imagem da superfície de um tecido após a remoção. a) Aumento de 50x; b) Aumento de 200x.

Para uma melhor visualização do comportamento da profundidade de penetração, a Figura 4.41 apresenta estes valores para cada experimento realizado com a rocha fosfática fina, para os quatro tecidos pesquisados. Pode-se observar que não houve uma tendência clara da profundidade de penetração aumentar ou diminuir com o número de ciclos, como observado no trabalho de MARTINS et al. (2001b).

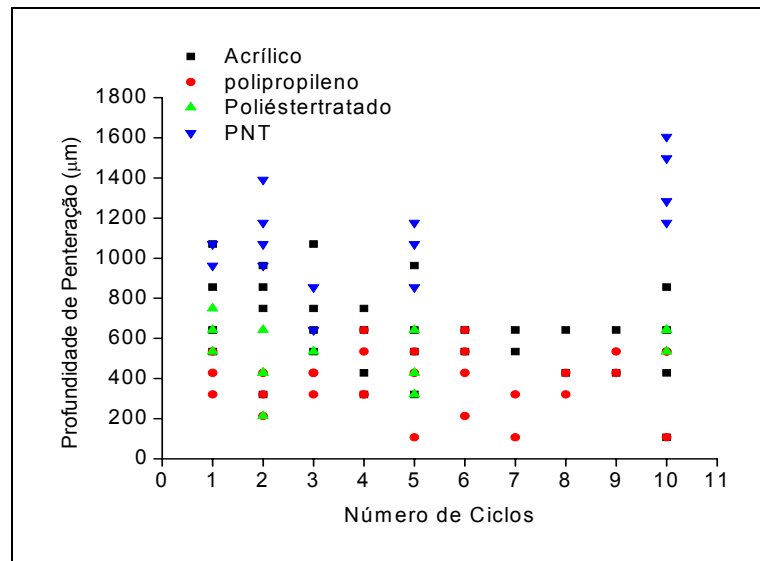


Figura 4.41: Profundidade de penetração dos experimentos com rocha fina.
(!) AC; (.) PP; (7) PT; (B) PNT.

Verifica-se que o poliéster sem tratamento exibiu a maior profundidade de penetração de todos os tecidos, alcançando até cerca de 1.600 μm , e que o acrílico foi o que mostrou uma maior profundidade entre os tecidos tratados (máxima em torno de 1.000 μm). Comparando-o com o polipropileno, cuja penetração não ultrapassou 600 μm , verifica-se que houve uma penetração mais profunda no feltro de acrílico. Este comportamento ratifica as suspeitas levantadas na análise da massa retida, que foi menor para o polipropileno, em comparação ao acrílico, de modo que seria possível deduzir que a maior massa retida corresponde à maior penetração de partículas no interior do tecido. Observa-se também que para o tecidos sem tratamento a profundidade de penetração foi maior, pela maior permeabilidade e porosidade, que permitiram uma maior acomodação de partículas nos meios filtrantes.

Por meio destes resultados, pode-se sugerir que a as filtrações com estas condições operacionais e para este material pulverulento obteriam melhores resultados se forem realizadas com o acrílico ou com o poliéster tratado, pois estes tecidos apresentaram um comportamento mais estável com o número de ciclos, no que se refere à massa coletada, retida e removida, oferecendo uma remoção adequada que resultaria em perdas de cargas residuais inferiores, se comparados aos demais tecidos, o que diminuiria os custos energéticos de operação.

Comparando-se as imagens obtidas em MEV, apresentadas nas Figuras 4.10, 17, 24 e 31, verificou-se que as partículas de rocha fina tenderam a permanecerem em torno das fibras, mesmo após a limpeza. Este comportamento evidencia o que pode ter sido dendritos, formados durante a primeira fase da filtração. Estes dendritos indicam que houve a ação do mecanismo de captura por difusão browniana com alguma intensidade. Para confirmar esta suspeita, foram realizados cálculos pertinentes aos mecanismos de coleta por interceptação e por impactação. Os parâmetros foram calculados a partir do diâmetro de Stokes, do diâmetro médio volumétrico e do diâmetro de Stokes calculado pelo diâmetro aerodinâmico. Desta forma calculou-se o número de Stokes (St), o adimensional R e o número de Peclet, que fornecem dados sobre a influência da impactação, da interceptação e da difusão, respectivamente. Os valores calculados para o poliéster tratado (PT) são iguais para o poliéster não tratado, sendo assim, omitidos da Tabela 4.26. A viscosidade dinâmica (μ) foi considerada, a $T=20^{\circ}\text{C}$ (293 K), igual a $1,82 \cdot 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ e a pressão utilizada nos cálculos foi de 1 atm. No cálculo de Peclet, considerou-se o livre caminho médio (λ) igual a $0,066 \mu\text{m}$, constante de Boltzman (k) igual a $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$. Assim, o coeficiente difusional da equação (2.3) pode ser dado pela equação 4.6:

$$D = \frac{k.T.C_c}{3.\pi.\mu.d_p} \quad (4.6)$$

em que C_c é o fator de correção de Cunningham, dado pela equação 4.7:

$$C_c = 1 + \frac{2,52.\lambda}{d_p} \quad (4.7)$$

Os resultados podem ser avaliados pela Tabela 4.26. De acordo com a teoria da captura por uma fibra simples apresentada no Capítulo 2, para números de Stokes menores que 0,1 a impactação passa a ser desprezível na captura de partículas, e para R menor que 0,1 a interceptação também se torna insignificante. Pelos valores apresentados para estes adimensionais, verifica-se que em nenhum caso aqui estudado estes mecanismos podem ser desprezados.

Tabela 4.26: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis.

Experimento		AC	PP	PT
Material		Rocha fina	Rocha fina	Rocha fina
d_f (10^4 cm)		22,7	23,6	19,43
d_p Stokes (10^4cm)		3,71	3,71	3,71
Adimensional calculado	St	0,51	0,50	0,6
	R	0,16	0,16	0,19
	Pe	337.885	351.281	289.211
d_p méd. vol. (10^4cm)		4,55	4,55	4,55
Adimensional calculado	St	0,78	0,75	0,91
	R	0,20	0,19	0,23
	Pe	417.707	434.268	357.535
d_p St calc (10^4cm)		2,74	2,74	2,7
Adimensional calculado	St	0,32	0,25	0,33
	R	0,18	0,12	0,14
	Pe	245.796	255.541	210.388

No entanto, apesar dos pequenos valores de St e R, o número de Peclet foi relativamente elevado. Como comentado no Capítulo 2, quanto maior Pe, menor a deposição difusional, tem-se que para estes experimentos, apesar de pequeno diâmetro, o efeito difusional é pouco significativo.

Uma última observação a respeito das filtrações em diferentes tecidos foi que, apesar de se manter a vazão de alimentação de pó constante de 1,96 g/min, cada tecido foi capaz de coletar uma massa diferente por tempo, como mostra a Tabela 4.27.

Tabela 4.27: Comparação da vazão de pó média coletada em cada tecido.

Tecido	AC	PP	PT	PNT
Vazão (g/min)	1,09	1,06	1,29	1,27

Este comportamento revela um fato interessante, descrito na literatura e observado nestes experimentos, a respeito da relação gás-pano. Esta relação existe para que se defina uma faixa de vazão nas condições operacionais, adequada para limpar determinada vazão de gás. Assim, verificou-se que como os tecidos, em princípio, estariam recebendo a mesma quantidade de material, alguns deles, como o PT, seriam capazes de reter maior quantidade deste material, enquanto os demais apresentaram um pequeno retorno de pó à caixa de alimentação, sendo então, necessária uma relação gás-

pano maior. Verificou-se também que o tratamento pareceu não interferir na vazão de massa coletada, uma vez que estes valores para o PT e o PNT foram muito próximos.

O efeito da eficiência não foi considerado, mas como observou-se pelas imagens, poucas partículas seriam capazes de atravessar o meio filtrante. Além disso, a própria profundidade de penetração ilustra este fato, sendo encontradas partículas apenas até uma distância razoável da extremidade oposta do meio filtrante.

4.8 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO - POLIÉSTER TRATADO E POLVILHO (8,67 μM)

Como foi verificado no Capítulo 3, o polvilho doce não pode ter seu diâmetro médio volumétrico determinado, por ser um material solúvel em água, o meio utilizado para realizar as análises, portanto, considerou-se seu diâmetro de Stokes de 8,67 μm . Os experimentos em poliéster tratado foram realizados também utilizando polvilho como material pulverulento, possibilitando uma avaliação mais ampla do efeito da forma da partícula sobre a filtração. Neste tópico serão apresentadas as curvas de filtração e as características destas filtrações, sendo que a comparação será realizada em tópico a parte. A Figura 4.42 ilustra o comportamento das curvas de filtração do poliéster tratado filtrando o polvilho.

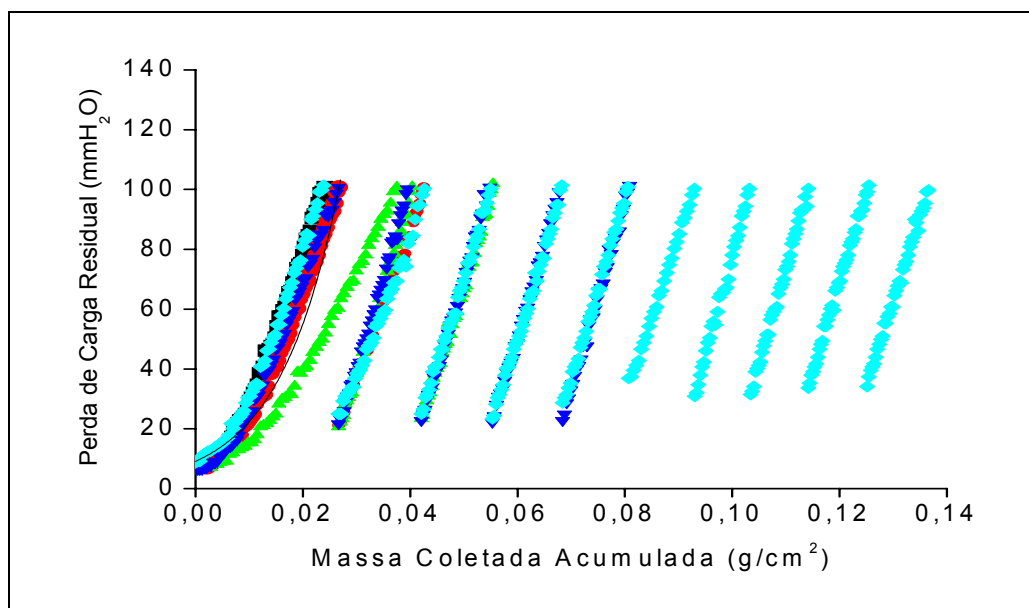


Figura 4.42: Perfil da perda de carga para os dez ciclos de filtração para o Poliéster tratado com polvilho. (◐) Ensaio 01; (◑) Ensaio 02; (◒) Ensaio 03; (◓) Ensaio 05; (◔) Ensaio 10.

Verifica-se que, comparado aos ensaios anteriores, a massa coletada por unidade de área foi significativamente superior e as curvas dos nove ciclos finais são bastante semelhantes entre si. Houve, no ciclo 1 do ensaio 3, algum problema experimental não esclarecido, que resultou em uma perturbação do perfil convencional de filtração.

Observa-se que a massa coletada por ciclo torna-se aproximadamente constante após o sétimo ciclo do PT, como apresenta a Tabela 4.28.

Por meio da Figura 4.42, é possível constatar ainda que, exceto no primeiro ciclo, as curvas de filtração apresentam forma praticamente linear todo o tempo, sendo inexistente o comportamento em “S” observado nos ensaios anteriores. Este comportamento pode ser atribuído, entre outros fatores, à forma da partícula, quase esférica. No entanto, não se encontrou na literatura consultada informações sobre a influência da forma das partículas na configuração das curvas de filtração. Verifica-se também que, exceto na curva correspondente ao primeiro ciclo do ensaio 3, as curvas de filtração foram bastante reprodutíveis. Provavelmente, a torta formada por partículas mais regulares se arranje de modo mais uniforme, com menos variação em sua distribuição espacial.

Tabela 4.28: Variação da massa coletada média com o número de ciclos do Poliéster tratado e polvilho.

Ciclo	Massa (g/cm²)
1	0,0267
2	0,0154
3	0,0132
4	0,0131
5	0,0123
6	0,0123
7	0,0104
8	0,0107
9	0,0110
10	0,0114

Além disso, os coeficientes angulares das curvas foram bastante parecidos, o que se refletiu em valores de resistência específica da torta formada nos diferentes ciclos, muito semelhantes entre si, como apresentado pela Tabela 4.29, lembrando que, a partir do ensaio 6 houve apenas uma curva, a do ensaio 10, por isso os desvios padrões

não foram ser calculados. Pode ser que este comportamento constante seja resultado da eficiência de remoção de torta, que gerou *patches* maiores que nos ensaios com a rocha fosfática fina.

Tabela 4.29: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Poliéster tratado e polvilho.

Ciclo	K_2 (s ⁻¹)	Desvio padrão
1	$4,7 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^3$
2	$5,2 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^3$
3	$5,7 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^3$
4	$5,8 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^3$
5	$6,0 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^3$
6	$5,3 \cdot 10^4$	-
7	$6,6 \cdot 10^4$	-
8	$6,2 \cdot 10^4$	-
9	$5,8 \cdot 10^4$	-
10	$5,5 \cdot 10^4$	-

Do mesmo modo como apresentaram todos esses dados muito próximos de valores constantes, as massas removida e retida acumulada também foram quase constantes desde o primeiro ciclo, como mostra a Figura 4.43.

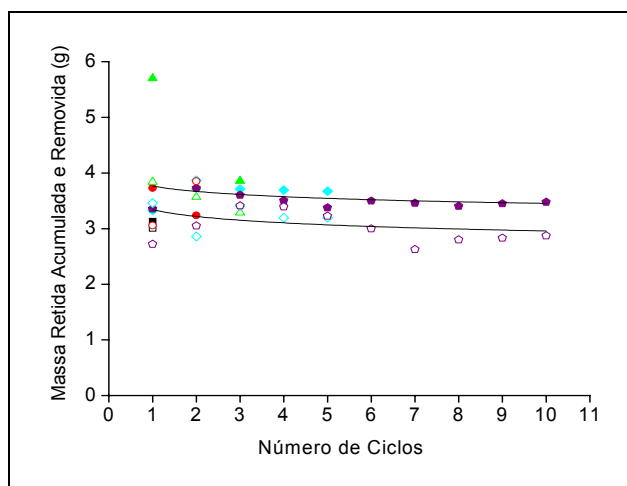


Figura 4.43: Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o Poliéster tratado e polvilho: (○) Ensaio 01; (□) Ensaio 02; (△) Ensaio 03; (◇) Ensaio 05; (□) Ensaio 10.

O fato de os valores serem constantes desde os primeiros ciclos pode indicar que o maior tempo de filtração inicial tenha resultado na maior saturação do conjunto torta-tecido já no início do processo.

Verificando o comportamento da perda de carga residual, mostrada pela Figura 4.44, observa-se que a taxa de aumento de perda de carga foi pouco significativa, sendo também quase constante, seguindo aproximadamente o comportamento da massa retida acumulada, como observado nos demais experimentos.

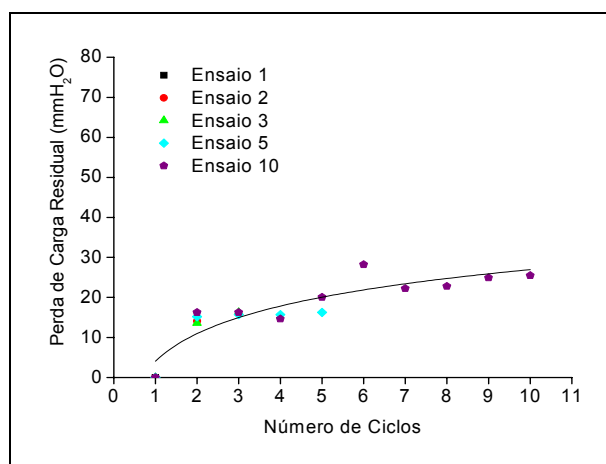


Figura 4.44: Perfil da variação de perda de carga residual para os ensaios com Poliéster tratado e polvilho.

A relação entre a massa retida e a perda de carga residual resultante pode ser mais explicitamente observada pela Figura 4.45, em que se pode observar que estes parâmetros não apresentaram um comportamento definido nos experimentos realizados, não sendo possível realizar o ajuste dos pontos.

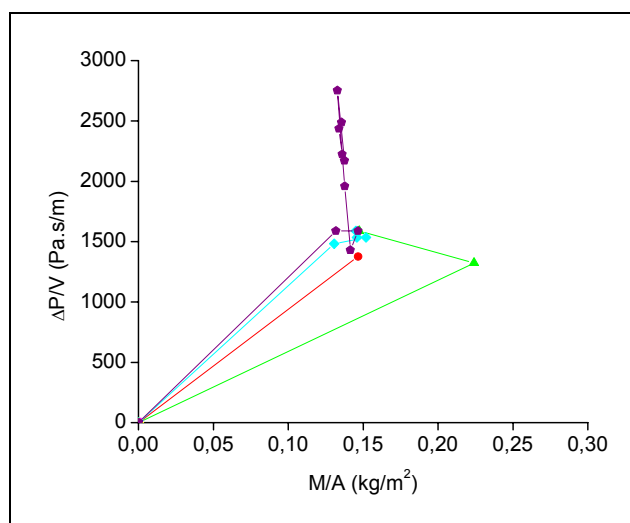


Figura 4.45: Relação entre a perda de carga residual e a massa retida para o Poliéster tratado e polvilho: (○) Ensaio 01; (●) Ensaio 02; (●) Ensaio 03; (▲) Ensaio 05; (□) Ensaio 10.

MAUSCHVITZ (2004) comenta que as massas retidas e as perdas de carga residuais podem não ter uma relação direta por causa do que o autor chamou de fator de rearranjo, ou seja, a massa de partículas retida após a limpeza busca uma acomodação interna que vise a menor perda de carga.

Assim, a massa de material, que durante a filtração tenha provocado uma perda de carga “x” provocará uma perda de carga residual menor se ficar retida no filtro após a limpeza. Esta razão é o fator de rearranjo.

Como a torta formada nestas condições foi mais espessa, era esperado que a eficiência fosse maior, com ilustra a Figura 4.46.

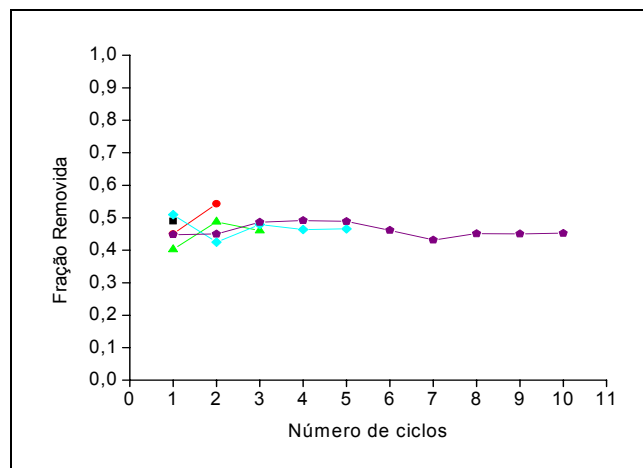


Figura 4.46: Perfil da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para o Poliéster tratado e polvilho. (●) Ensaio 01; (▲) Ensaio 02; (♣) Ensaio 03; (◀) Ensaio 05; (☆) Ensaio 10.

Esta elevada eficiência pode ter se refletido no comportamento praticamente linear das curvas de filtração, após a primeira limpeza, pois como concluído no trabalho de MOREIRA et al. (1999), maiores eficiências de remoção das tortas poderiam ser observadas pela forma das curvas subsequentes à limpeza, sendo que as curvas lineares correspondem a elevadas eficiências de remoção. Porém deve-se considerar que se tratam de materiais e condições operacionais diversas nos dois experimentos (diâmetro de partícula: $36\mu\text{m}$, meio filtrante: feltro de poliéster, mecanismo de limpeza: vibração mecânica, velocidade de filtração: $5,0\text{ cm/s}$) sendo que se sugere que sejam realizados testes desta natureza em trabalhos subsequentes para averiguar este comportamento.

Este fato pode ainda estar relacionado ao tamanho dos pedaços de torta removidos que, no caso do polvilho, foram expressivamente maiores que para a rocha fosfática fina. RODRIGUES (2004) verificou este comportamento, percebendo que os

maiores pedaços removidos foram observados para maiores eficiências de remoção. Comportamento semelhante foi observado também no trabalho de TIENI (2005). No entanto, tais autores não relacionaram a linearidade das curvas com o tamanho dos patches removidos.

Para este material pulverulento, realizaram-se as análises de penetração de partículas no Poliéster tratado. As imagens de algumas colunas de alguns ciclos obtidos via microscopia óptica podem ser observadas pela Figura 4.47, que apresenta as cinco primeiras fotos de cada coluna analisada, totalizando cerca de $1.500\mu\text{m}$, sendo que cada foto representa uma profundidade de aproximadamente $310\mu\text{m}$.

Verifica-se, nestas imagens, que a acomodação das partículas nas camadas mais internas do tecido não ocorreu apenas em torno das fibras, como ocorreu no caso da rocha fosfática fina, mas as partículas se encontraram acomodadas também no seio do tecido. Esta acomodação diferente pode ser atribuída à ação de diferentes mecanismos de captura, o que será objeto de estudo do item 4.10. Em termos quantitativos, a Tabela 4.30 apresenta os valores de número de partículas, bem como a profundidade de penetração.

A variação do diâmetro médio das partículas com a profundidade do tecido e com o número de ciclos não foi realizada para os experimentos com polvilho por este se tratar de um material considerado praticamente monodisperso.

Por meio da Tabela 4.30 é possível verificar a variação da profundidade média de penetração de partículas com o número de ciclos, que variou entre 1.200 e $2.500\mu\text{m}$, aproximadamente, sem apresentar tendência definida de aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

Apesar da maior eficiência de remoção, verificou-se que esta não interferiu na profundidade de penetração de partículas, o que demonstrou que a limpeza tenha uma ação mais superficial do que interna na remoção do material particulado acumulado no tecido.

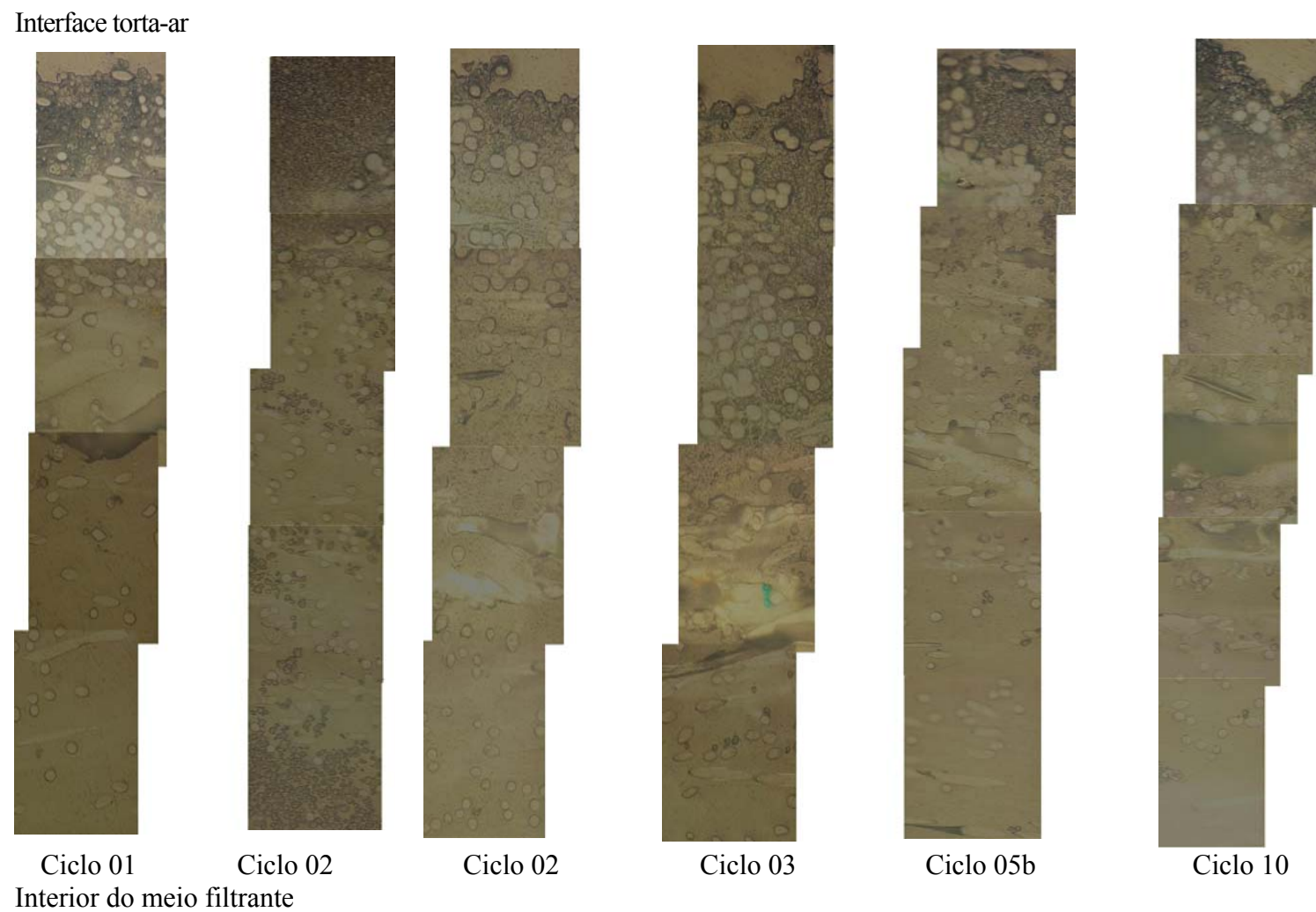


Figura 4.47: Seção transversal do poliéster tratado em diferentes ciclos para o polvilho. Aumento de 200X

Tabela 4.30: Penetração de partículas no Poliéster tratado: número de partículas com a profundidade do tecido, filtrando polvilho.

Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				5				10			
0-312	620	669	417	225	476	641	423	538	368	198	462	330	345	421	121	371	285	69	155	232
312-624	212	46	18	36	337	225	229	372	56	266	430	64	115	85	32	96	100	6	37	77
624-936	14	11	5	18	476	259	265	568	12	54	112	21	63	69	14	58	30		154	20
936-1248	24		3	12	177	231	170	462		16	144		12	20		24	9		212	20
1248-1560	10			4	272	74	178	488			15					29	2		215	4
1560-1872	5			2	115	43	107	458			10					13	1		39	
1872-2184					17	17	70	352									2			
2184-2496						8	343	133									1			
2496-2808							614	146												
Soma	885	726	443	297	1870	1498	2399	3517	436	534	1173	415	535	595	167	591	430	75	812	353
Profundidade Média (μm)	1.482				2.496				1.248				1.326				1.716			

A Figura 4.48 apresenta a variação do número de partículas em cada camada de tecido, para cada ciclo. Observa-se que, como nos demais experimentos, não houve tendência definida do número de partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos. Porém, ao contrário dos demais tecidos utilizados, nota-se que as partículas permaneceram mais distribuídas ao longo de toda a profundidade do tecido, ao invés de apresentarem uma concentração nítida nas camadas superficiais, sendo esta tendência de diminuir com a profundidade menos evidente, principalmente no ensaio 2, sendo que o máximo de partículas retidas foi em torno de 700.

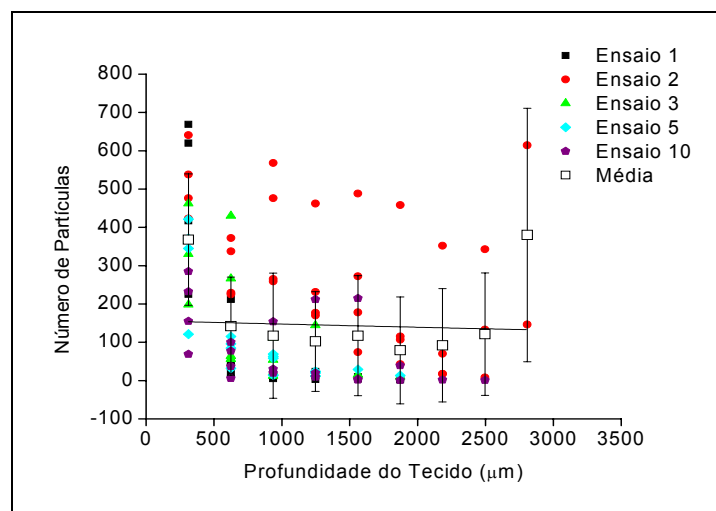


Figura 4.48: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster tratado e polvilho.

4.9 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO – POLIÉSTER NÃO TRATADO E POLVILHO (8,67 µm)

Com o intuito de se comparar o efeito do tratamento superficial, em um segundo material pulverulento, realizou-se os mesmos experimentos utilizando-se o PNT. As curvas de filtração realizadas em filtro de poliéster sem tratamento e polvilho estão apresentadas na Figura 4.49. Foram realizadas filtrações para 1, 2, 3, 5 e 10 ciclos.

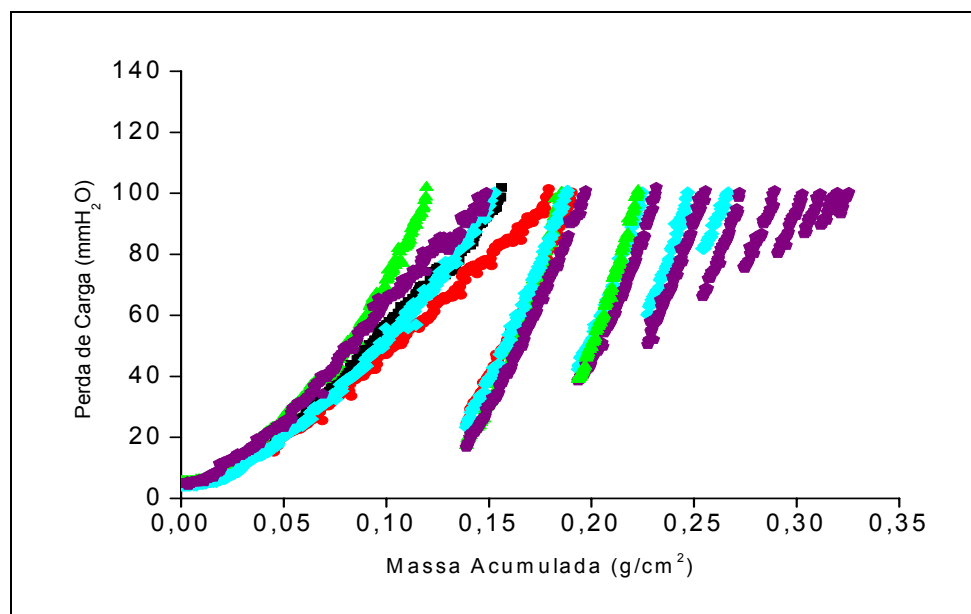


Figura 4.49: Perfil de perda de carga para os dez ciclos de filtração para o poliéster sem tratamento com polvilho. (◐) Ensaio 01; (◑) Ensaio 02; (↑) Ensaio 03; (▲) Ensaio 05; (◓) Ensaio 10.

Observa-se que os ciclos subseqüentes ao primeiro são praticamente lineares, como o foram para o tecido tratado. Deste modo, pode-se concluir que este comportamento linear é característico do material pulverulento, e não do meio filtrante. A duração cada vez menor dos ciclos de filtração verificados nesta Figura pode ser conferida na Tabela 4.31.

Tabela 4.31: Variação da massa coletada média do PNT com polvilho.

Ciclo	Massa (g/cm ²)
1	0,139
2	0,054
3	0,034
4	0,027
5	0,020
6	0,017
7	0,013
8	0,008
9	0,009
10	0,005

Pode-se notar que a massa coletada não tendeu a se tornar constante nos dez ciclos estudados, apresentando uma diminuição de duas ordens de grandeza do ciclo inicial para o décimo. Apesar da massa coletada ter variado ciclo a ciclo, a resistência

específica da torta pode ser considerada praticamente constante após a primeira limpeza, como pode ser comprovado pela Tabela 4.32, com pequenas variações no valor.

Tabela 4.32: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Poliéster não tratado e polvilho.

Ciclo	K_2 (s^{-1})	Desvio padrão
1	$2,5 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^3$
2	$1,5 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^3$
3	$2,0 \cdot 10^4$	$2,2 \cdot 10^3$
4	$1,8 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^3$
5	$1,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^3$
6	$1,5 \cdot 10^4$	-
7	$1,6 \cdot 10^4$	-
8	$1,6 \cdot 10^4$	-
9	$1,3 \cdot 10^4$	-
10	$1,5 \cdot 10^4$	-

A exemplo do corrido para a massa coletada, as massas retida e removida acumulada não tornaram-se constantes, como mostra a Figura 4.50. Verifica-se que a massa removida tendeu a diminuir drasticamente com o passar dos ciclos, indicando um provável decaimento na eficiência de remoção. Já os valores da massa retida acumulada indicaram que houve um acúmulo contínuo de material particulado no conjunto torta-tecido nos dez ciclos estudados.

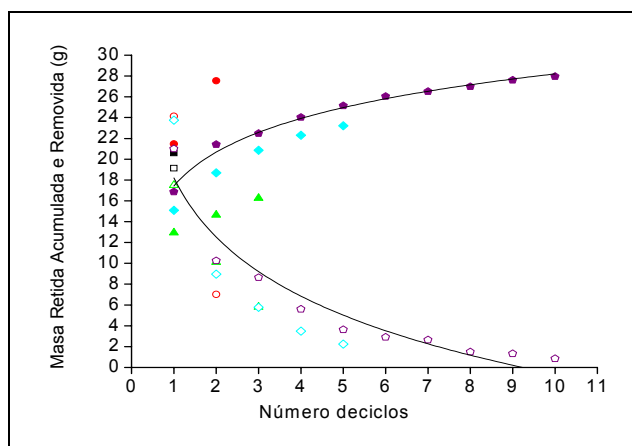


Figura 4.50: Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o Poliéster não tratado e polvilho. (∇) Ensaio 01; (.-) Ensaio 02; (78) Ensaio 03; (AM) Ensaio 05; (□□) Ensaio 10.

A perda de carga residual provocada pelo acúmulo de material no tecido é mostrada na Figura 4.51, em que se verifica o significativo aumento destes valores com os ciclos, não apresentando nenhuma tendência a se tornar constante.

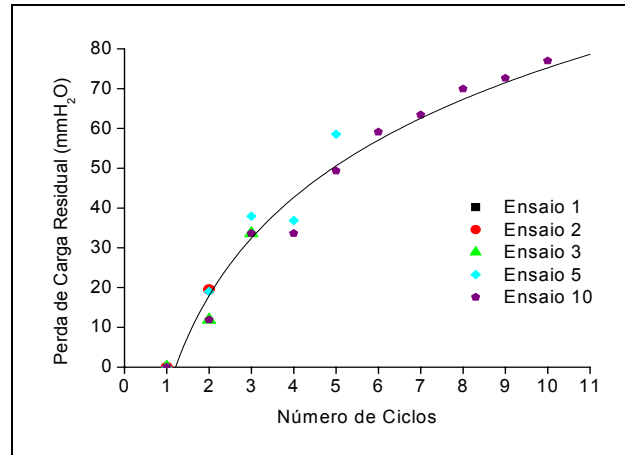


Figura 4.51: Perfil da variação de perda de carga residual de cada ciclo de filtração para o poliéster não tratado e polvilho.

Nitidamente verifica-se também para estes experimentos que a perda de carga residual apresentou comportamento semelhante ao da massa retida acumulada. Esta relação pode ser observada pela Figura 4.52.

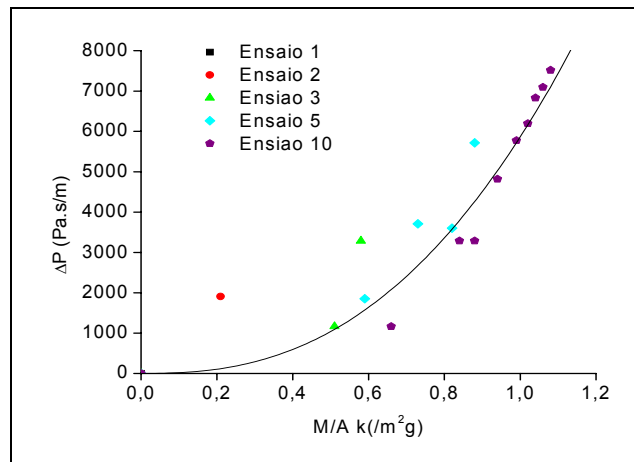


Figura 4.52: Perda de carga residual com a massa retida acumulada nos experimentos com PNT e polvilho.

Verifica-se que a relação entre a massa retida acumulada e a perda de carga residual apresentou um comportamento que indicou uma relação potencial da perda de carga residual com a massa retida, após o primeiro ciclo, que pode ser expressa pela equação 4.8:

$$\frac{\Delta P}{V} = 5865 \cdot \left(\frac{M_{\text{ret}}}{A} \right)^{2,50} \quad (4.8)$$

A eficiência de remoção de torta responsável pela perda de carga residual está apresentada na Figura 4.53.

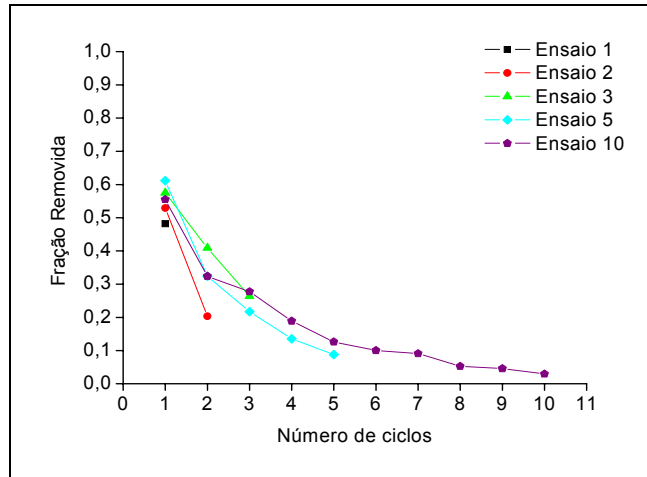


Figura 4.53: Perfil da fração de massa removida após a limpeza para o poliéster sem tratamento e polvilho.

Verificando o comportamento da eficiência de remoção e associando-o à forma das curvas das filtrações, pode-se concluir que, no caso do polvilho em PNT, o comportamento linear teve pouco a ver com a porcentagem de torta removida, ao contrário do que afirmou MOREIRA et al. (1999), uma vez que tanto quando a eficiência era maior, nos primeiros ciclos, quanto quando esta eficiência decaiu, nos ciclos finais, as curvas mantiveram seus comportamentos lineares.

Esta constatação reforça os indícios de que o comportamento das curvas está mais ligado às características do material pulverulento do que à eficiência de remoção propriamente dita.

As imagens do interior do meio filtrante podem ser observadas a partir da Figura 4.54, que apresenta as cinco primeiras fotos de algumas colunas de alguns ciclos analisados, totalizando uma profundidade de cerca de 1.500 μm , sendo que cada foto possuía altura de aproximadamente 310 μm .

A Tabela 4.34 apresenta os valores obtidos para a profundidade de penetração das partículas bem como o número de partículas encontradas em cada uma das camadas do tecido.

Por meio desta Tabela é possível verificar a variação da profundidade de penetração de partículas com o número de ciclos. A profundidade média atingida pelas partículas variou entre 1.600 e 3.200 μm , aproximadamente, sem apresentar tendência definida de aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

Verifica-se nestas imagens, a exemplo dos experimentos com PT e polvilho, que a acomodação das partículas nas camadas mais internas do tecido não ocorreu apenas em torno das fibras, como ocorreu no caso da rocha fosfática fina, mas as partículas se encontraram acomodadas também no seio do tecido.

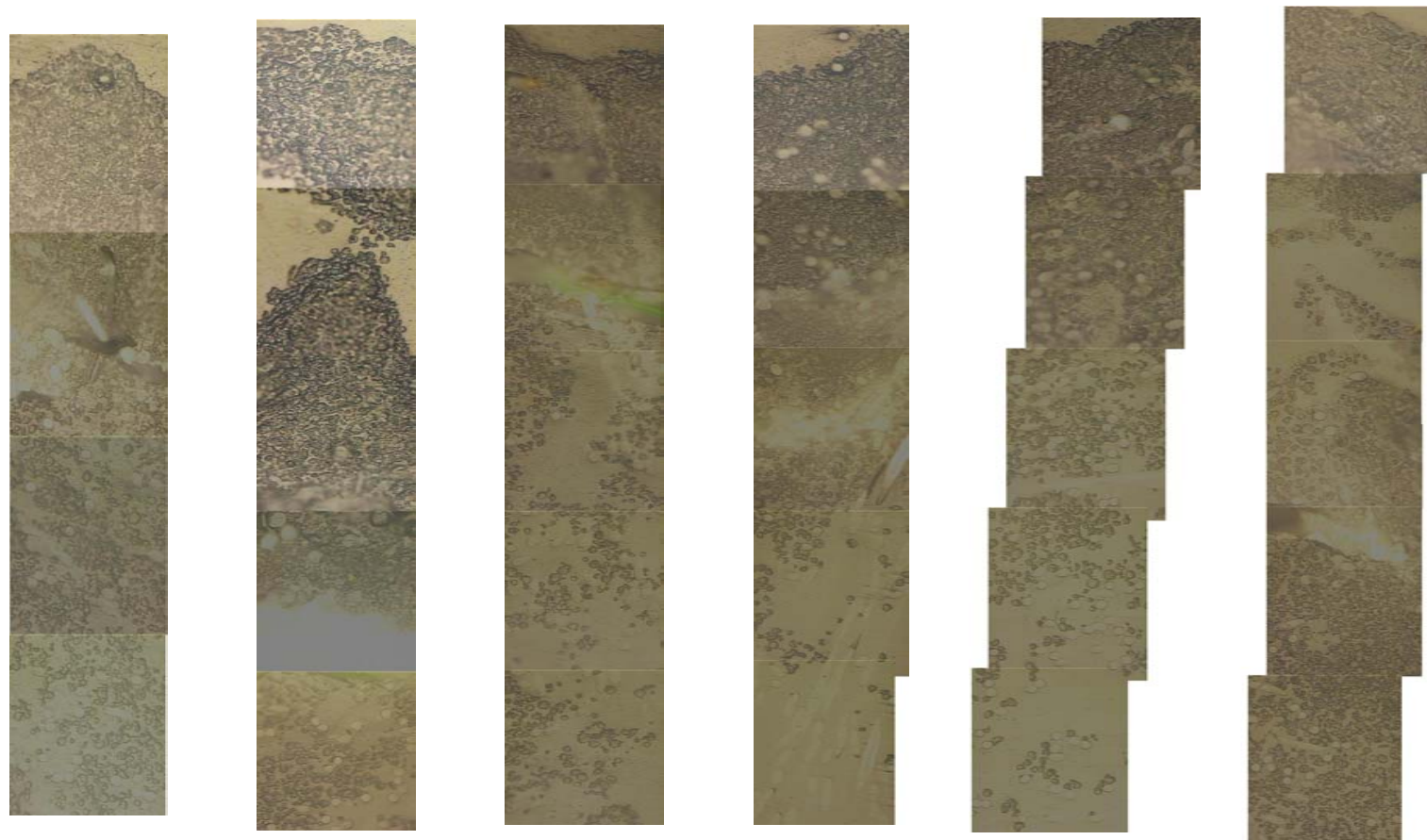
Esta acomodação diferente pode ser atribuída à ação de diferentes mecanismos de captura, o que será objeto de estudo do item 4.10.

Além disso, a penetração atingiu, em alguns casos, até a última camada do tecido, como ocorreu para uma coluna do ciclo 5, com um número considerável de partículas, o que pode indicar que houve o atravessamento total das partículas, ressaltando uma baixa eficiência de captura do mecanismo (ou mecanismos) de captura predominante (s).

A Figura 4.55 apresenta a variação do número de partículas em cada camada de tecido, para cada ciclo.

Similarmente aos demais tecidos utilizados, nota-se que a maior parte das partículas concentra-se nas camadas mais superficiais do tecido, tendendo a diminuir exponencialmente com a profundidade, sendo que o máximo de partículas retidas foi menor que 800.

Interface torta-ar



Ciclo 01a
Interior do meio filtrante

Ciclo 02a

Ciclo 02b

Ciclo 03

Ciclo 03

Ciclo 05

Figura 4.54: Seção transversal do poliéster não tratado em diferentes ciclos para o polvilho. Aumento de 200 X.

Tabela 4.33: Penetração de partículas no Poliéster tratado: número de partículas com a profundidade do tecido, filtrando polvilho.

Profundidade (μm)	Ensaio																			
	1				2				3				5				10			
0-312	321	365	199	174	476	641	423	538	640	275	583	573	361	377	240	333	178	458	362	261
312-624	498	298	103	82	337	225	229	372	486	568	276	298	243	175	323	223	106	675	259	231
624-936	323	610	34	0	476	259	265	568	251	200	260	354	212	229	414	441	301	319	421	522
936-1248	283	533	30	8	177	231	170	462	130		502	254	330	492	275	502	275	230	644	567
1248-1560	185	386		6	272	74	178	488	18		94	65	238	553	426	332	426	160	390	399
1560-1872	205	391		7	115	43	107	458	6		5		45	349	357	386	416	113	294	244
1872-2184	20	18			17	17	70	352			2		23	136	316	331	285	36	210	40
2184-2808						8	343	133					73	40	389	320	64	80	205	195
2808-2496							614	146					21	15	420	148	29	111	46	104
2496-2808															453	43	12	25		17
2808-3120															189		2			28
3120-3432															246					
Soma	1835	2601	366	277	1870	1498	2399	3517	1531	1043	1722	1544	1546	2366	4048	3059	2094	2207	2831	2608
Profundidade Média (μm)	1.872				2.574				1.638				3.120				3.198			

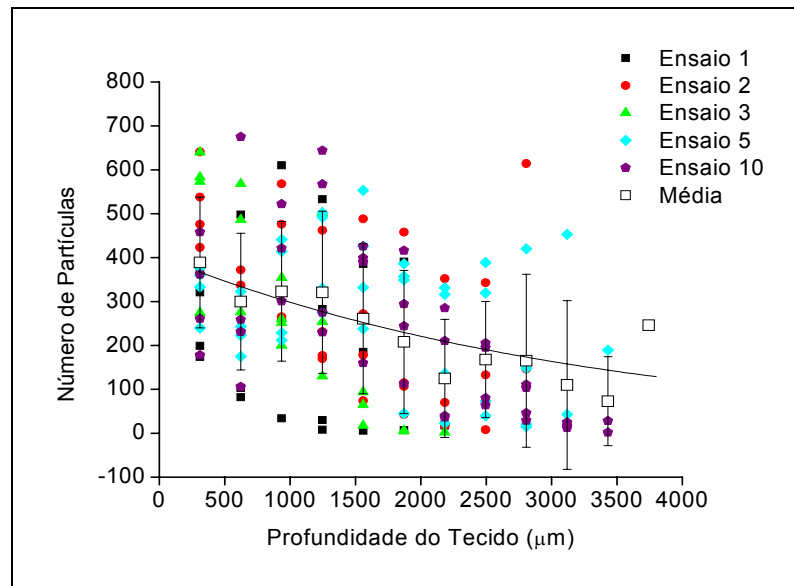


Figura 4.55: Variação do número de partículas com a profundidade do tecido para o Poliéster não tratado e polvilho.

Verifica-se também, que não houve tendência definida do número de partículas aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

4.10 COMPARAÇÃO ENTRE A PRESENÇA E AUSÊNCIA DE TRATAMENTO DOS MEIOS FILTRANTES E ENTRE A FORMA E DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS

Por meio destes experimentos desejou-se verificar a influência do tratamento dos filtros para um segundo material particulado, com propriedades diferentes do material inicialmente testado. A exemplo dos experimentos realizados com a rocha fosfática fina, cujo diâmetro de Stokes é de $3,71 \mu\text{m}$, o tecido sem tratamento filtrando polvilho doce, com diâmetro de Stokes de $8,67 \mu\text{m}$, apresentou maior período de filtração interna, sendo que este primeiro ciclo teve uma massa total coletada igual à coletada nos dez ciclos do tecido tratado, devendo-se considerar a menor densidade do polvilho ($1,48 \text{ g/cm}^3$) em relação à rocha fina ($2,79 \text{ g/cm}^3$). A comparação dos dez ciclos de filtração do ensaio 10 para os quatro experimentos pode ser observada pela Figura 4.56.

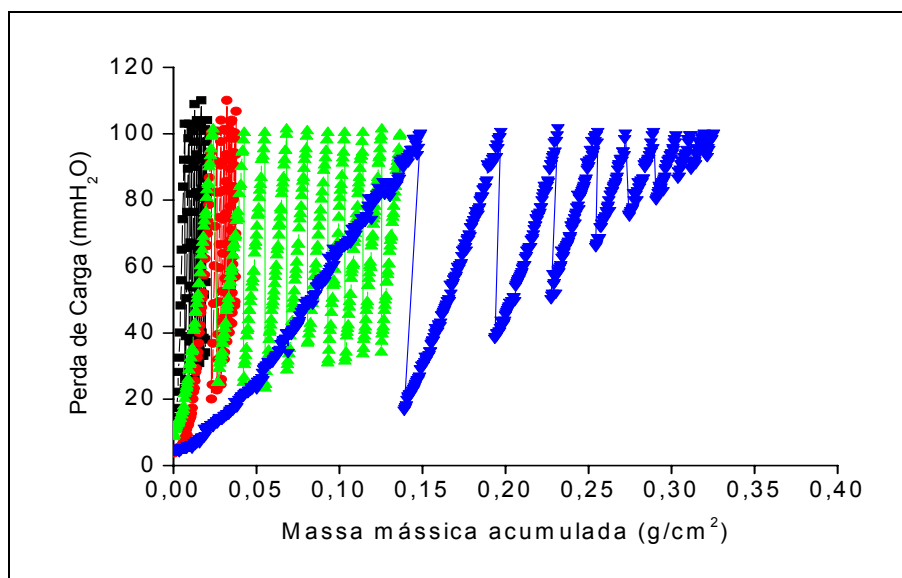


Figura 4.56 : Gráfico comparativo das curvas de filtração do ensaio 10, entre o poliéster tratado e não tratado filtrando rocha fosfática fina e polvilho. (!)
PT e rocha; (.) PNT e rocha; (7) PT e polvilho; (B) PNT e polvilho.

Verifica-se que os ciclos de filtração com a rocha fina foram significativamente mais curtos que os com polvilho, para ambos os meios filtrantes, principalmente para o primeiro ciclo, o que se refletiu nos valores dos respectivos pontos de colmatação, como mostra a Tabela 4.34, obtidos através da Figura 4.57.

Tabela 4.34: Ponto de colmatação médio determinado para cada um dos ensaios de cada tecido e material pulverulento estudados.

Tecido	Ponto de colmatação (10^3 g/cm^2)
PT e rocha fina	2,45
PNT e rocha fina	10,9
PT e polvilho	6,3
PNT e polvilho	25,2

A partir da Figura 4.57, pode-se verificar que o período de filtração interna é pouco significativo nas partículas irregulares e menores da rocha fosfática em PT, quando comparado com as partículas de polvilho. Porém, com relação ao tratamento, a comparação entre os tecidos tratado e não tratado leva à conclusão de que a ausência de tratamento permite que mais partículas sejam coletadas e se acomodem no interior do meio filtrante, ou até mesmo atravessem-no, como apresentado nos experimentos anteriores com PNT e polvilho.

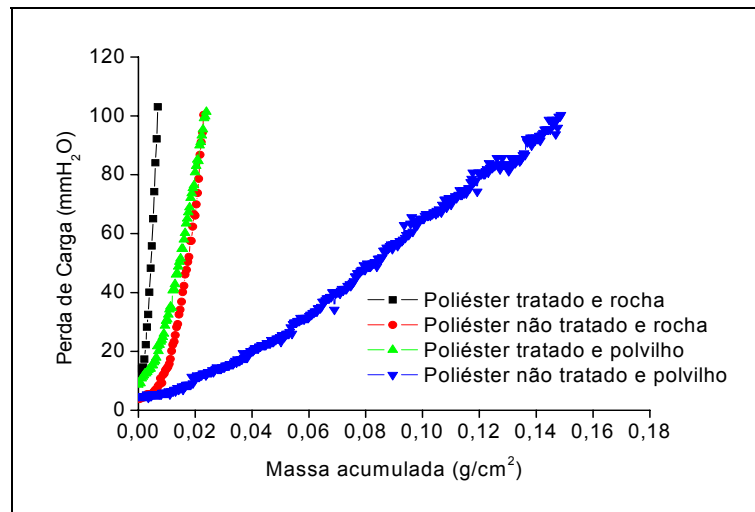


Figura 4.57: Primeiro ciclo dos experimentos com PT e PNT, com rocha fosfática fina e polvilho. (1) PT e rocha fosfática; (2) PNT e rocha fosfática; (3) PT e polvilho; (4) PNT e polvilho.

Pela Tabela comparativa 4.35, verifica-se algumas similaridades na filtração em tecido tratado e não tratado, para os dois materiais filtrantes.

Observa-se que a massa coletada foi significativamente superior nos tecidos não tratados, e nos mesmos não notou-se tendência destes valores se tornarem constantes nos dez ciclos analisados. Já nos tecidos tratados, esta tendência aparece em torno do quinto ciclo para os dois pós.

Nota-se também que as filtrações com polvilho coletaram maior massa, mesmo sendo este material menos denso que a rocha fina, resultando em uma torta formada significativamente mais espessa.

Este comportamento sugere que a acomodação das partículas quase esféricas do polvilho favoreça a passagem do ar, conferindo uma menor perda de carga durante a filtração.

Além disto, no caso de tortas constituídas por partículas irregulares, a formação de caminhos preferenciais pode ser significativa e há de se considerar também o maior atrito do fluido com as paredes das partículas irregulares, aumentando a resistência específica.

Tabela 4.35: Variação da massa coletada média para o PT e PNT com rocha fina e com polvilho.

Ciclo	Massa coletada (g/cm ²)			
	Rocha Fina		Polvilho	
	PT	PNT	PT	PNT
1	0,0074	0,0219	0,0267	0,139
2	0,0020	0,0022	0,0154	0,054
3	0,0012	0,0021	0,0132	0,034
4	0,0015	0,0015	0,0131	0,027
5	0,0013	0,0017	0,0123	0,020
6	0,0012	0,0017	0,0123	0,017
7	0,0011	0,0011	0,0104	0,013
8	0,0011	0,0009	0,0107	0,008
9	0,0010	0,0014	0,0110	0,009
10	0,0010	0,0008	0,0114	0,005

Este fato pode ser confirmado quando se analisa a resistência específica das tortas, pela Figura 4.58, em que se verifica que mesmo para o PNT filtrando rocha, a resistência da torta é maior que para o PT filtrando polvilho.

Além disso, observa-se que a taxa de aumento da resistência específica da torta com o decorrer dos ciclos é mais significativa para as filtrações com a rocha fosfática fina que com o polvilho, para ambos os tecidos, sendo para o polvilho praticamente constante.

Este comportamento pode ser atribuído ao fato de que a torta formada pela rocha, por ser menos espessa, é removida na forma de pedaços bastante pequenos, enquanto que no caso do polvilho, os pedaços são grandes e bem definidos, sendo que no caso da rocha fosfática fina resultou em uma maior formação de canais e no caso do polvilho doce, os maiores pedaços removidos minimizaram tal efeito.

Tal fato pode ainda ser decorrente das propriedades de cada material, que, no caso do polvilho, resultaram em uma torta menos compacta.

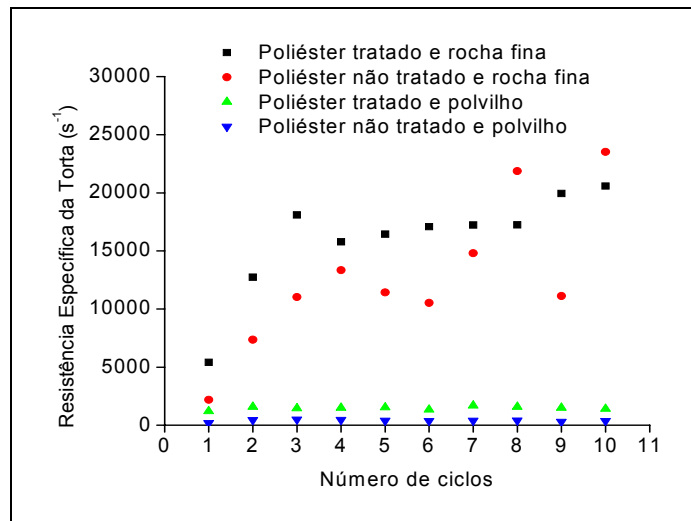


Figura 4.58: Comparação entre a resistência específica média da torta entre os experimentos com tecidos tratados e não tratados para a rocha fina e o polvilho doce.

Com as massas coletadas para os experimentos com a rocha fina menores que para o polvilho, as massas retidas e removidas para este material também o foram, como apresenta as curvas da Figura 4.59, de forma que, nos tecidos tratados a tendência da massa retida ser constante foi bem mais evidente que nos tecidos sem tratamento, sendo seu valor sempre inferior a este último.

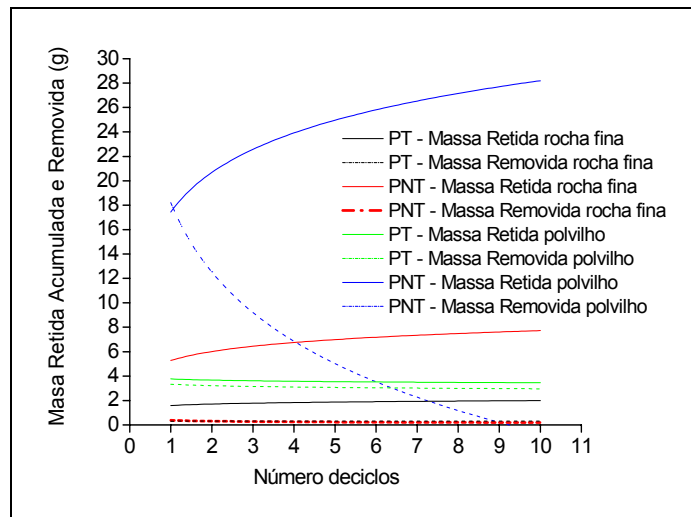


Figura 4.59: Massa de material pulverulento retida acumulada e removida para os experimentos com rocha fina e polvilho.

Além disso, observa-se que as massas removidas para o PT oscilaram em torno de um valor constante desde os primeiros ciclos, sendo que este comportamento não foi observado para o PNT, como mostra a Tabela 4.36.

Tabela 4.36: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os tecidos analisados com rocha fina e polvilho.

Ciclo	Massa Removida (g)				Massa Retida Acumulada (g)			
	Rocha fina		Polvilho		Rocha Fina		Polvilho	
	PT	PNT	PT	PNT	PT	PNT	PT	PNT
1	0,30	0,40	2,72	21,00	1,45	5,45	3,36	16,87
2	0,38	0,33	3,05	10,25	1,64	5,96	3,73	21,42
3	0,39	0,27	3,41	8,63	1,65	6,31	3,60	22,48
4	0,44	0,25	3,39	5,60	1,64	6,52	3,51	24,02
5	0,41	0,15	3,23	3,64	1,61	6,80	3,38	25,13
6	0,35	0,19	3,00	2,89	1,59	6,96	3,50	26,03
7	0,32	0,14	2,63	2,65	1,60	7,07	3,46	26,50
8	0,28	0,19	2,80	1,50	1,62	7,13	3,41	26,97
9	0,29	0,16	2,83	1,32	1,62	7,22	3,45	27,60
10	0,32	0,12	2,87	0,85	1,63	7,34	3,48	27,95

O comportamento da massa retida acumulada sugeriu que, no caso do poliéster sem tratamento, houve um acúmulo de massa ciclo a ciclo, indicado pela tendência crescente da curva para ambos os materiais filtrados (rocha fina e polvilho), o que indica que o conjunto tecido-torta ainda tinha capacidade para acomodar partículas, de modo que seria necessário realizar mais ciclos para afirmar que este conjunto poderia vir a saturar-se. Isto quer dizer que, nos tecidos sem tratamento, alguma parcela da massa coletada permaneceu retida no meio filtrante ou na sua superfície, após a limpeza.

No caso dos tecidos tratados estes valores permanecem praticamente constantes para ambos os materiais, o que indica que, para este tecido, toda a massa coletada na filtração foi removida na limpeza, não havendo acúmulo no tecido. O reflexo da massa retida pode ser também observado pela verificação da intensidade de penetração das partículas nos tecidos, em termos numéricos, com apresenta a Figura 4.64, que ilustra o número total de partículas encontradas em cada uma das quatro colunas de tecido analisadas, por unidade de área, já que os microscópios utilizados foram diferentes, e também o aumento (200 x para o microscópio ótico e 2000x para o MEV) para os dois meios filtrantes e para os dois materiais pulverulentos.

Considerando apenas o tratamento, verificou-se que para os dois materiais pulverulentos a penetração foi mais intensa e mais profunda para os tecidos sem tratamento. Este comportamento pode ser observado também através da Figura 4.60,

que ilustra o número total de partículas coletadas por unidade de área em cada seção transversal de tecido analisada.

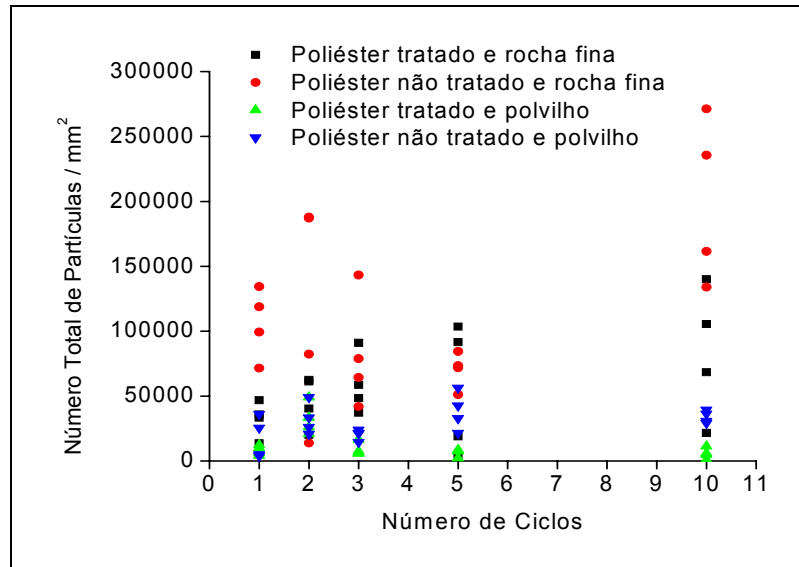


Figura 4.60: Total de partículas coletadas em cada coluna analisada, por ciclo, para os experimentos com tecidos tratados e sem tratamento, filtrando rocha fina e polvilho.

A Figura 4.60 mostra que para nenhum caso o número total de partículas tendeu a aumentar ou diminuir com o número de ciclos, apesar de um ligeiro aumento no ensaio 10 dos experimentos com rocha fina, que não podem ser admitidos exatamente como uma tendência ou um comportamento isolado daquele experimento. No entanto, apesar da massa retida dos ensaios com polvilho ter sido superior, o número de partículas presentes em cada camada analisada foi inferior, o que não era esperado. No entanto, este fato pode ser explicado pela retenção de uma maior massa de torta residual na superfície do tecido, e não em seu interior.

O maior número de partículas no interior do PNT confirma os resultados apresentados na literatura, sendo da maior abertura da superfície do tecido, permitindo a penetração, em termos de massa e em termos de número de partículas, de uma maior quantidade de material pulverulento, ratificada ao se comparar as microfotografias realizadas e apresentadas na Figura 4.1.

A constatação de que a massa retida nos experimentos com polvilho foi expressivamente superior àquela apresentada nos experimentos com os mesmos tecidos, filtrando a rocha fina indicou que, não apenas o meio filtrante, mas também as propriedades do material pulverulento, influenciaram nas características da filtração.

Deste modo, o fato de o polvilho ser um material praticamente monodisperso e de partículas quase esféricas parece influenciar a filtração, uma vez que os interstícios dos canais formados entre as partículas do polvilho provavelmente não foram preenchidos por partículas menores como na filtração com rocha fina, o que provocou uma perda de carga maior para este último material, como apresentado anteriormente para a resistência específica da torta.

Assim, com uma estrutura interna de partículas também mais permeável, a filtração interna tornou-se mais longa para o polvilho, permitindo que mais partículas se acomodassem no conjunto torta-tecido.

A torta formada pelo polvilho também não sofreu esta colmatação intersticial que ocorreu na rocha fosfática, favorecendo uma filtração superficial também mais longa, até alcançar a perda de carga máxima estipulada.

Outro fator observado nas microfotografias foi que as partículas de polvilho parecem não formar dendritos, ou estes desapareceram após a limpeza, e suas partículas também não se apresentam acumuladas apenas ao redor das fibras, como ocorreu com a rocha fina, o que, segundo o trabalho de KANAOKA e HIRAGI (1990) pode ser atribuído à uma menor ação do mecanismo de coleta difusional nos experimentos com polvilho, como pode ser comprovado pelos cálculos destes mecanismos, como apresenta a Tabela 4.37, lembrando que o diâmetro médio volumétrico do polvilho não foi determinado pois o mesmo é solúvel em água.

Relembrando que para números de Stokes menores que 0,1 a impactação passa a ser desprezível na captura de partículas, e para R menores que 0,1 a interceptação também torna-se insignificante, verifica-se que em nenhum caso estes mecanismos são desprezíveis. No entanto, os valores do número de Stokes são significativamente superiores, podendo-se afirmar que é o mecanismo predominante, para qualquer diâmetro que se utilize.

Porém, nas filtrações com polvilho, os números de Stokes e o adimensional R foram superiores aos valores calculados para experimentos com rocha fina, o que indica que, para o polvilho a ação do mecanismo difusional pode ser desprezada. Outra constatação é a de que, apesar do número de Stokes ser maior que o R , indicando predominância da impactação, pode-se dizer que os dois valores não são desprezíveis e pode estar ocorrendo uma competição entre estes mecanismos, ocasionando uma

diminuição da eficiência, como comentado na literatura e verificado nos elevados valores de penetração de partículas, apresentado posteriormente.

Tabela 4.37: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis.

Experimento		PT	PT
Material		Rocha fina	Polvilho
d_f (10^4 cm)		19,43	19,43
d_p Stokes (10^4cm)		3,71	8,64
Adimensional calculado	St	0,6	1,66
	R	0,19	0,44
	Pe	289.211	690.492
d_p méd. vol. (10^4cm)		4,55	-
Adimensional calculado	St	0,91	-
	R	0,23	-
	Pe	357.535	-
d_p St calc (10^4cm)		2,7	7,96
Adimensional calculado	St	0,33	1,47
	R	0,14	0,41
	Pe	210.388	635.119

Com estas constatações consolidam-se as observações apontadas na literatura consultada, sobre o fato de que a não formação dos dendritos, ou sua formação menos intensa, resultaria em uma menor perda de carga durante a filtração interna e a superficial. O fato de a filtração interna ser mais longa no mesmo tecido para materiais diferentes pode indicar que os mecanismos de captura de partículas possa ser também diferenciado para cada um dos dois pós, como apontado pelos cálculos.

O resultado do acúmulo de partículas no meio filtrante foi o esperado aumento da perda de carga inicial de cada ciclo. A perda de carga residual de cada ciclo pode ser acompanhada pela Figura 4.61, em que estão dispostas as curvas médias das quatro séries de experimentos realizados. As curvas apresentadas são um ajuste logarítmico dos dados.

Apesar de inicialmente a perda de carga residual nos experimentos com poliéster sem tratamento e polvilho não apresentarem o maior valor, logo nos primeiros ciclos estes ultrapassam os valores de perda de carga residual dos tecidos tratados, com os materiais pulverulentos correspondentes.

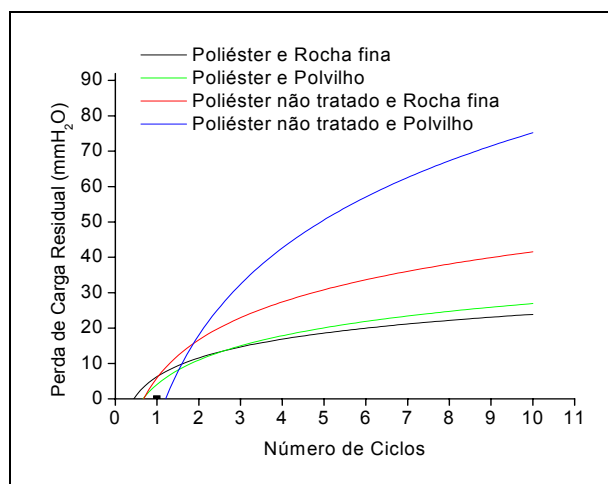


Figura 4.61: Curva média da variação de perda de carga residual de cada experimento.

Muito provavelmente, para o PNT, a maior quantidade de massa retida após a limpeza interferiu neste comportamento, provocando maior resistência à passagem do fluido. Como reflexo do ocorrido com a massa retida, a perda de carga residual para o PNT filtrando polvilho foi superior à do PNT filtrando rocha. Verifica-se também que o PNT não apresenta tendência do perfil de perda de carga residual se tornar constante durante os dez ensaios realizados, para nenhum dos materiais pulverulentos utilizados, com mostra a Tabela 4.38.

Tabela 4.38: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os tecidos analisados.

Ciclo	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)			
	Rocha Fina		Polvilho	
	PT	PNT	PT	PNT
1	0	0	0	0
2	11,39	18,97	16,26	11,93
3	12,47	18,97	16,26	33,61
4	14,10	20,60	14,64	33,61
5	14,10	28,19	20,06	49,34
6	18,43	33,61	28,19	59,10
7	18,97	36,32	22,23	63,43
8	21,14	39,04	22,77	69,94
9	21,14	39,04	24,94	72,65
10	22,23	44,46	25,48	76,99

As filtrações com polvilho em PT resultaram em maiores massas retidas que os mesmos experimentos com a rocha fosfática, o que se refletiu em uma maior perda de carga residual. No entanto, não se pode afirmar que entre os dois materiais

pulverulentos comparados neste tópico, haja proporcionalidade entre a massa retida e a perda de carga residual resultante, pois o que se observou foi que, a massa retida no PT com polvilho provocou uma menor perda de carga residual que a mesma massa de rocha fina. Provavelmente, a distribuição granulométrica mais estreita e a forma quase esférica do polvilho podem, novamente, resultar em menor resistência à passagem do ar, pela não obstrução dos espaços inter-partículas, como ocorre com a rocha fosfática fina, e a não formação dos dendritos pode também ter contribuído para esta menor perda de carga.

A Figura 4.62 apresenta uma comparação dos resultados de perda de carga residual e massa retida do Ensaio 10 realizado em cada experimento.

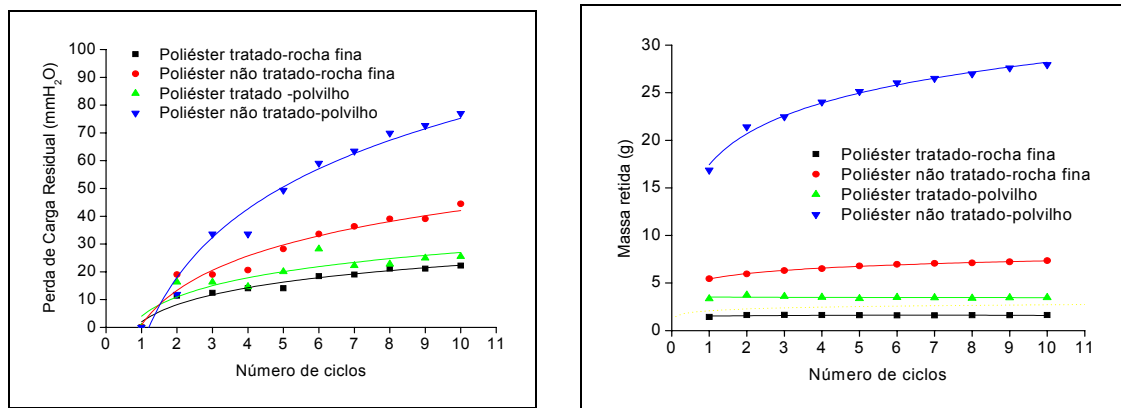


Figura 4.62: Gráfico comparativo do Ensaio 10 dos tecidos tratados e não tratados filtrando rocha fina e polvilho.

No caso dos experimentos avaliados neste tópico, assim como na comparação anterior, observa-se que o aumento da massa retida resultou em um aumento da perda de carga residual em todos os tecidos. Nota-se também, que houve correspondência no comportamento destes parâmetros entre os tecidos, de modo que o tecido que apresentou maior massa retida apresentou também maior perda de carga residual. Porém, deve-se lembrar, como discutido na primeira série de experimentos comparativos, que não houve proporcionalidade entre a massa retida e a perda de carga residual, de modo que nem sempre massas iguais ou próximas resultem em valores próximos de perda de carga residual. A Figura 4.63 ilustra esta relação para os experimentos pertinentes a este grupo de experimentos, observando-se que a curva para o PT filtrando rocha é a correspondente ao Ensaio 10 desta série de experimentos, uma vez que não foi possível obter-se um ajuste dos valores experimentais.

Verifica-se nos experimentos com rocha fosfática fina, que a taxa de aumento de perda de carga foi significativamente superior que para os experimentos com o polvilho, pelos motivos já citados.

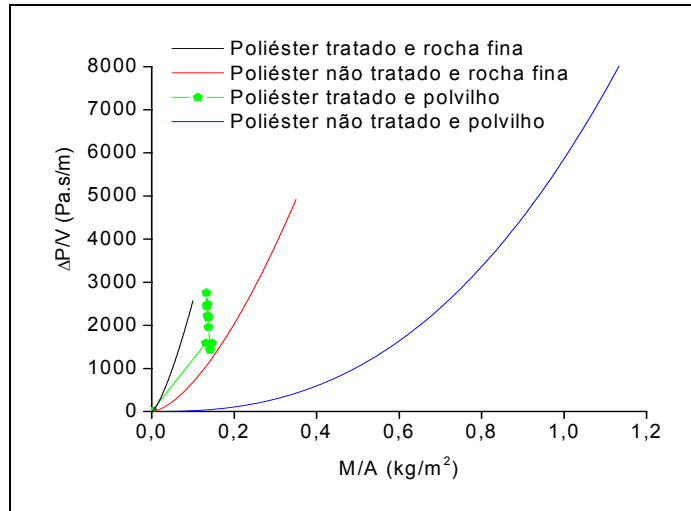


Figura 4.63: Comparação do comportamento da perda de carga residual com a massa retida para os tecidos com e sem tratamento filtrando rocha fina e polvilho.

No entanto, quando se avalia a eficiência de remoção da limpeza, através apenas das curvas de perda de carga residual, esperar-se-ia que o poliéster tratado filtrando polvilho apresentasse eficiência semelhante às filtrações com rocha neste mesmo tecido, já que as curvas de perda de carga residual foram bem próximas.

Porém, observando-se a Figura 4.64, nota-se que a eficiência de limpeza nos experimentos com o polvilho em PT foram muito superiores aos experimentos com rocha em PT.

Este comportamento foi resultado da maior espessura de torta formada pelo polvilho e, portanto, de uma maior massa removida. Apesar da massa retida em ambos os materiais filtrantes terem sido próximas, o que vem confirmar o encontrado na literatura, que comenta que a perda de carga residual não seria o parâmetro adequado para se avaliar a eficiência de remoção de material particulado.

Verificou-se ainda que, para os tecidos sem tratamento, com ambos os materiais pulverulentos, a eficiência de remoção, em princípio, foi semelhante ou superior aos experimentos com os tecidos tratados. Porém, com o decorrer do seu uso, a eficiência de remoção foi se deteriorando até patamares significativamente baixos.

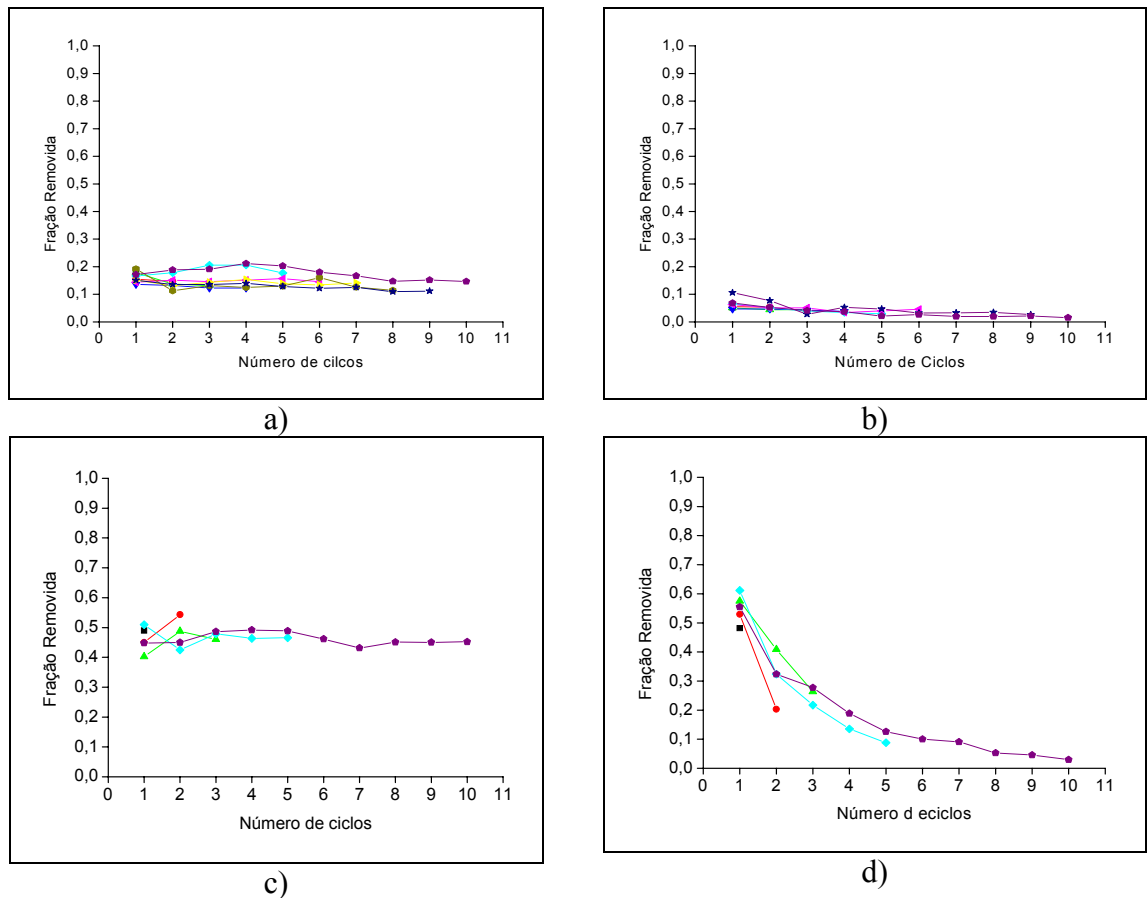


Figura 4.64: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para: a) PT e rocha; b) PNT e rocha; c) PT e polvilho; d) PNT e polvilho. (!) Ensaio 01; (.) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (A) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06; (β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

Provavelmente, esta deterioração da qualidade da remoção se deveu ao fato de prevalecer a maior espessura de torta presente inicialmente em detrimento do tratamento superficial, o que resultou na elevada massa removida. Posteriormente, com a diminuição da torta depositada, a ausência de tratamento prevaleceu sobre a espessura de torta formada, que era cada vez menor, diminuindo a eficiência de remoção.

Outra constatação diz respeito ao formato em “S”, observado nos ciclos seguintes ao primeiro, nos ensaios com a rocha fina, e que não foi observado nos ensaios com o polvilho. Pode ser que a maior eficiência de limpeza interfira neste comportamento, como comentado por MOREIRA et al. (1999), ou também que o tamanho dos pedaços removidos, que foram maiores no caso do polvilho também interfira neste comportamento. No entanto, como observado nos experimentos com PNT e polvilho, se pode concluir que o comportamento linear teve pouco a ver com a

porcentagem de torta removida, ao contrário do que afirmou MOREIRA et al. (1999), uma vez que tanto quando a eficiência era maior, nos primeiros ciclos, quanto quando esta eficiência decaiu, nos ciclos finais, as curvas mantiveram seus comportamentos lineares. Esta constatação reforçou os indícios de que o comportamento das curvas está mais ligado às características do material pulverulento do que à eficiência de remoção propriamente dita.

Após o tratamento descrito no ANEXO A, realizou-se a análise de penetração. No caso do polvilho, como citado anteriormente, por se tratar de um material monodisperso, foi feito o levantamento da profundidade de penetração e do número de partículas, mas não do diâmetro das mesmas.

As curvas comparativas entre os experimentos com polvilho podem ser observadas na Figura 4.65. Estas curvas foram construídas considerando-se a diferença entre as áreas analisadas em MEV e em microscópio óptico. Os dados das curvas são os mesmos das curvas originais, porém divididos pelas áreas analisadas em cada microscópio.

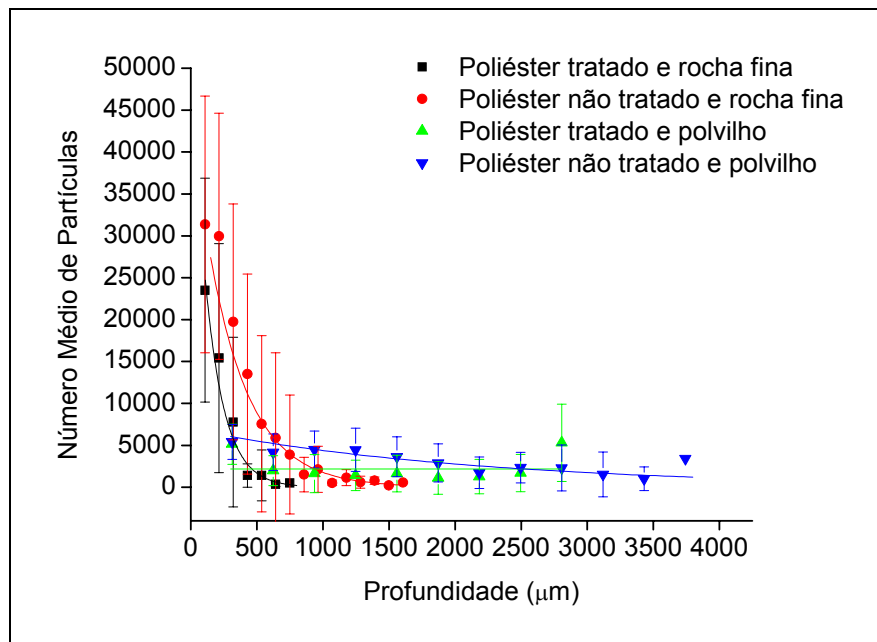


Figura 4.65: Curvas da variação do número médio de partículas com a profundidade do tecido para o poliéster com e sem tratamento, filtrando rocha fina e polvilho.

Verifica-se claramente a diferença na profundidade de penetração entre as partículas de rocha fina e de polvilho, sendo que as primeiras alcançaram uma menor profundidade para os dois tecidos. Nas primeiras camadas pode-se verificar que o

número de partículas foi superior para a rocha fina com o tecido tratado e não tratado. No entanto, conforme aumentou a profundidade do tecido, notou-se que o número de partículas presentes passou a ser maior nas filtrações com polvilho tanto para os filtros com quanto para os sem tratamento, o que indicou uma acomodação mais homogênea de partículas no interior do tecido, com menos tendência a um decaimento exponencial de número de partículas. Pode ser que os dendritos formados pela rocha fina tenham impedido a passagem de mais partículas para o interior do filtro.

A profundidade de penetração atingida para as partículas de polvilho foi tão elevada que se pode considerar que houve, inclusive, a penetração total através dos tecidos, ou seja, a diminuição da eficiência de coleta deste material particulado, como pode ser visualizado na Figura 4.66. Verificou-se que, para uma coluna do poliéster tratado filtrando polvilho houve uma penetração maior que a espessura do meio. Isso se deveu às variações na espessura que o tecido apresenta, não sendo considerada um erro experimental, ou seja, naquele ponto o tecido tinha realmente uma espessura maior que a média obtida nos ensaios.

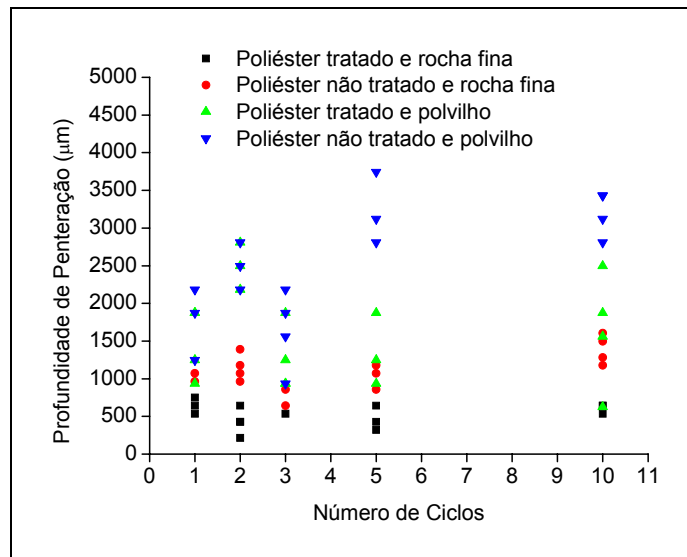


Figura 4.66: Profundidade de penetração atingida em cada coluna analisada para os ensaios com PT e PNT com rocha fina e polvilho.

Com estes resultados, pode-se concluir que a profundidade e intensidade de penetração foram maiores para o experimento que mostrou a maior massa retida, ou seja o PNT com polvilho.

4.11 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO – ACRÍLICO E ROCHA GROSSA (14,67 μm) $\Delta P_{\text{MAX}} = 100\text{mmH}_2\text{O}$

Como o Acrílico seria um dos tecidos selecionados para filtrar a rocha fosfática, este foi escolhido também para realizar experimentos em que pudessem ser avaliados os efeitos do aumento do diâmetro de partículas e do aumento da perda de carga máxima admitida filtrando o mesmo tipo de material.

Assim, este item apresenta as características da filtração em acrílico da rocha grossa admitindo-se uma perda de carga máxima de 100 mmH_2O .

As curvas de filtração dos ensaios realizados estão apresentadas na Figura 4.67. As análises de microscopia de varredura foram realizadas apenas nos ciclos 1, 5 e 10, uma vez que verificou-se anteriormente que a profundidade de penetração não variava com o número de ciclos.

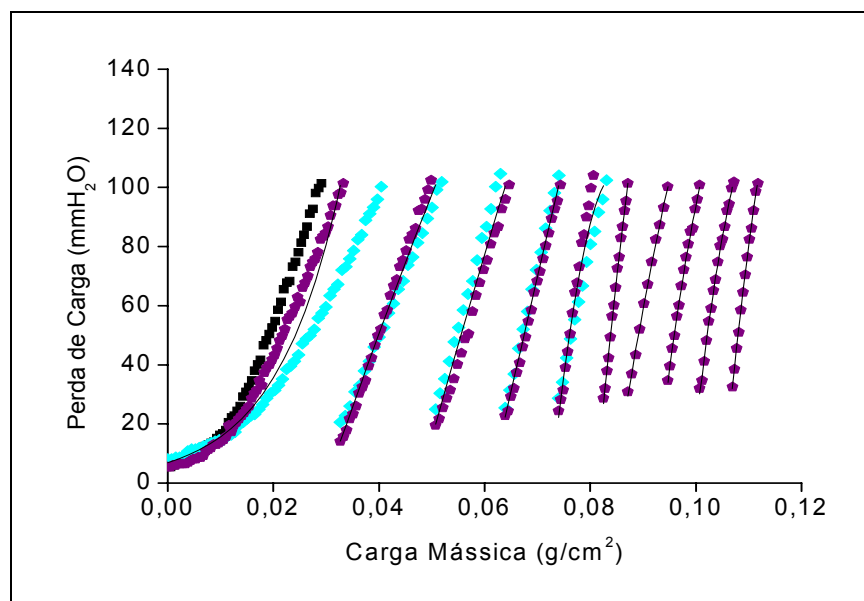


Figura 4.67: Perfil da perda de carga para os dez ciclos de filtração para o acrílico com a rocha grossa, 100 mmH_2O . (!) Ensaio 01; (A) Ensaio 05; (□) Ensaio 10.

Por meio da Figura 4.67 pode-se verificar o período de filtração interna no primeiro ciclo, sendo que nos ciclos subsequentes as curvas foram praticamente lineares.

No entanto, como mostra a Tabela 4.39, não se pôde afirmar sobre constância da massa coletada por ciclo. Observa-se um pequeno desvio de comportamento da curva do ciclo 6 do ensaio 10, provocada por alguma variação no comportamento

experimental não identificado, que se refletiu nos demais valores das características deste ciclo. O ponto de colmatação médio verificado no ciclo 1 destes ensaios foi igual a $9,82 \cdot 10^{-3} \pm 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2$.

Tabela 4.39: Massa coletada em cada ciclo para o experimento com Acrílico e rocha grossa, filtrando até 100 mmH₂O.

Ciclo	Massa (g/cm²)
1	0,0327
2	0,0180
3	0,0132
4	0,0101
5	0,0085
6	0,0046
7	0,0075
8	0,0061
9	0,0062
10	0,0047

Verificou-se também que, apesar da linearidade das curvas, a variação da resistência específica média da torta com o número de ciclos foi significativa, apresentando uma tendência crescente ciclo a ciclo, exceto para o ciclo 6, como apresenta a Tabela 4.40.

Tabela 4.40: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha grossa, até 100 mmH₂O.

Ciclo	K₂ (s⁻¹)	Desvio padrão
1	$4,0 \cdot 10^4$	$7,1 \cdot 10^{43}$
2	$4,7 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^3$
3	$6,2 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^3$
4	$7,8 \cdot 10^4$	$8,2 \cdot 10^2$
5	$1,0 \cdot 10^5$	$3,0 \cdot 10^4$
6	$1,6 \cdot 10^5$	-
7	$9,2 \cdot 10^4$	-
8	$1,1 \cdot 10^{45}$	-
9	$1,1 \cdot 10^5$	-
10	$1,4 \cdot 10^5$	-

Avaliando-se a variação das massas retida acumulada e removida com o número de ciclos, pela Figura 4.68, nota-se que, ao contrário do que ocorreu para os

tecidos tratados, ambas as massas não apresentaram tendência a se tornarem constantes nos dez ciclos realizados.

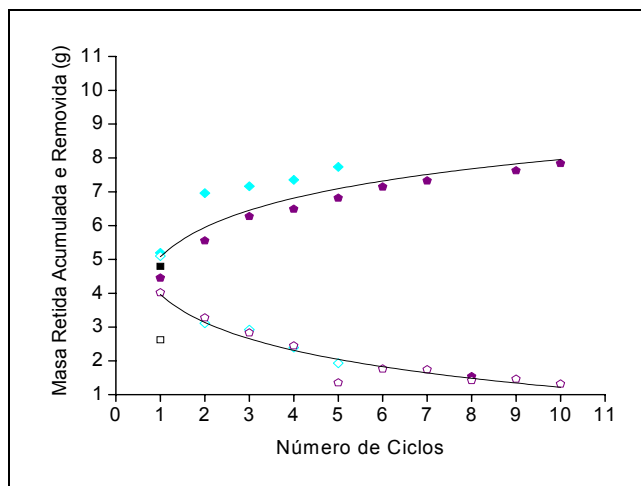


Figura 4.68: Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o Acrílico filtrando rocha grossa, 100 mmH₂O (!) Ensaio 01; (Δ) Ensaio 05; (\square) Ensaio 10.

Desta forma, durante estes ciclos, ocorreu um aumento de massa retida no meio filtrante e uma remoção cada vez menor de partículas.

Esta retenção de material particulado resultou, como esperado, num aumento da perda de carga residual, verificado na Figura 4.69.

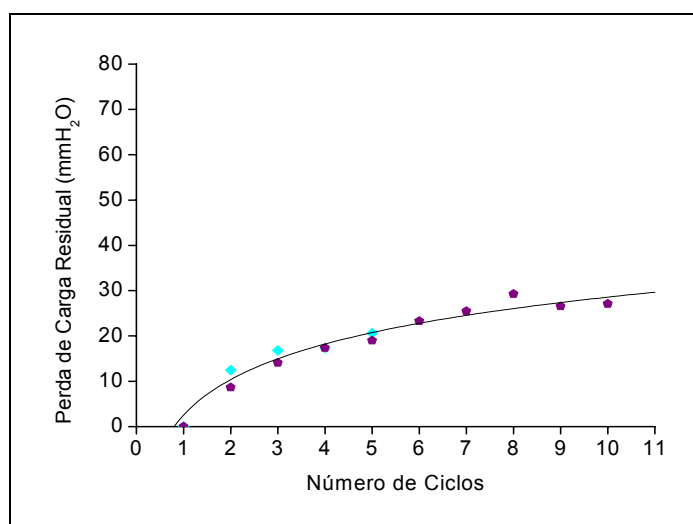


Figura 4.69: Perfil da variação de perda de carga residual de cada ciclo de filtração para o Acrílico filtrando rocha grossa, 100 mmH₂O. (!) Ensaio 01; (Δ) Ensaio 05; (\square) Ensaio 10.

Apesar da massa retida acumulada não tender a se tornar constante, a perda de carga residual apresentou tendência à constância a partir do sétimo ciclo. Pode ser que a

massa de pó esteja se acumulando na superfície do filtro, como observado nos demais experimentos, ou, conforme MAUSCHITZ et al. (2005), esteja havendo um rearranjo interno de partículas.

Associando este comportamento com a massa retida, tem-se a Figura 4.70 em que se observa o comportamento da perda de carga residual com a massa retida acumulada.

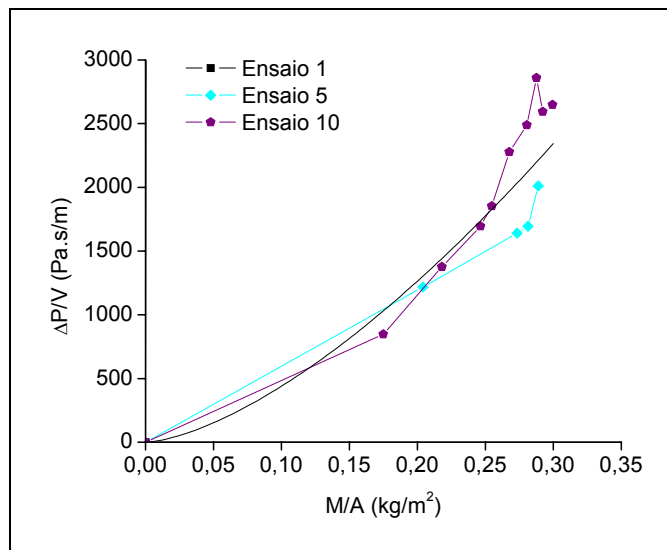


Figura 4.70: Relação da perda de carga residual com a massa retida acumulada para o AC e rocha grossa.

Verifica-se um comportamento potencial, como nos demais experimentos, que pode ser ajustado à curva representada pela equação 4.9:

$$\frac{\Delta P}{V} = 14656 \cdot \left(\frac{M_{\text{ret}}}{A} \right)^{1,52} \quad (4.9)$$

Este aumento da perda de carga residual, provocado pela acumulação de partículas representa, de certa forma a degradação da qualidade da limpeza com o número de ciclos, com o que pode ser observado pela Figura 4.71.

Verifica-se que a fração de massa removida tendeu a apresentar valores decrescentes ciclo a ciclo, sem que estes convergissem para a constância nos dez ciclos estudados.

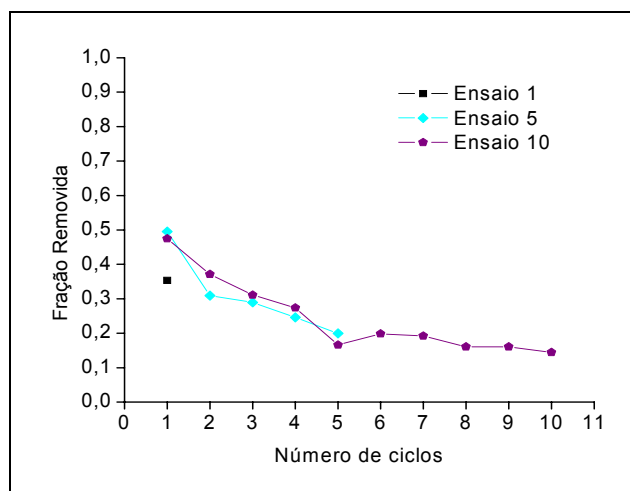


Figura 4.71: Perfil da variação de perda de carga residual de cada ciclo de filtração para o Acrílico filtrando rocha grossa, 100 mmH₂O.

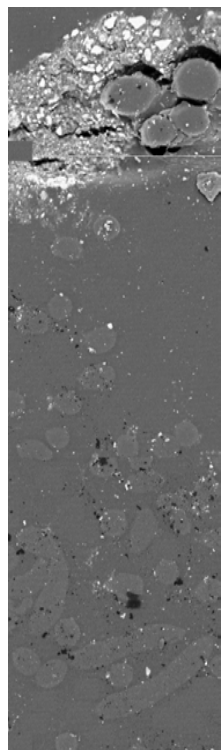
As imagens obtidas via MEV de alguns ciclos dos ensaios aqui tratados estão apresentadas na Figura 4.72.

A microfotografia correspondente ao ciclo 10c teve apenas 4 fotografias pois após esta camada não houve mais partículas presentes.

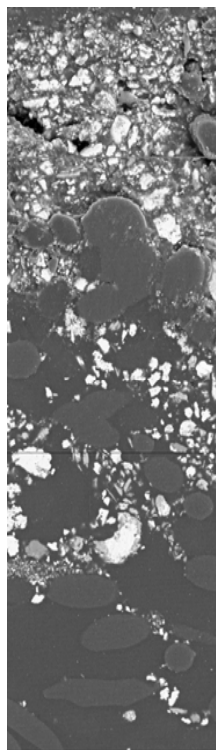
Pode-se verificar pela Tabela 4.41 que a profundidade média variou entre cerca de 500 e 1.250 μm , sem tendência da mesma aumentar ou diminuir com o número de ciclos.

Do mesmo modo, o diâmetro de partículas não apresentou tendência definida de variação com o número de ciclos. O desvio padrão do diâmetro de partículas em cada camada analisada está apresentado na Tabela 4.42.

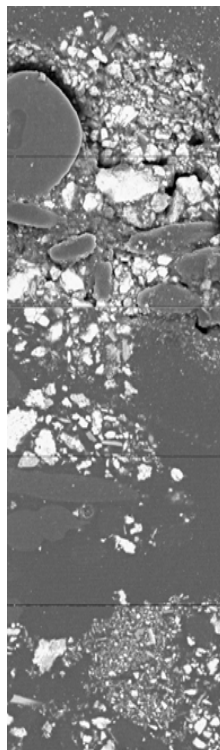
Interface torta-ar



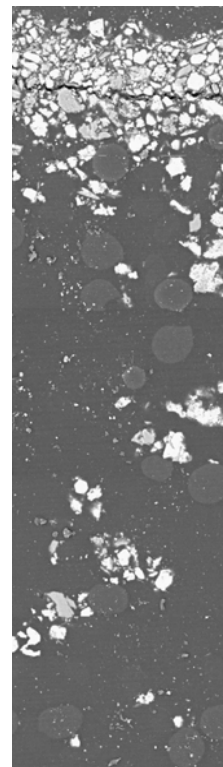
Ciclo 01a



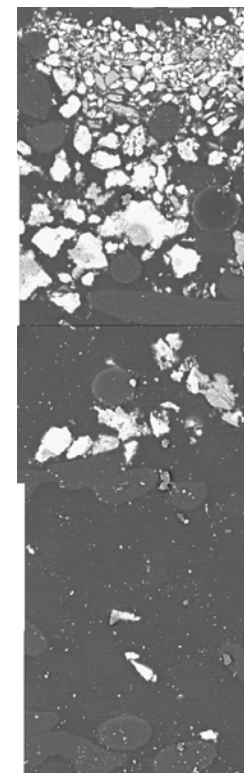
Ciclo 05a



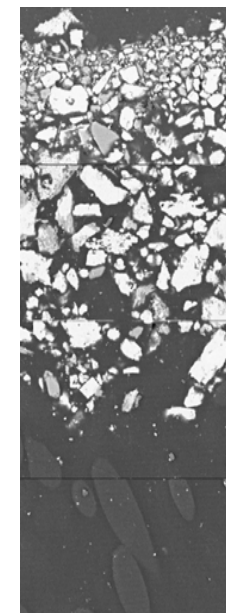
Ciclo 05b



Ciclo 10a



Ciclo 10b



Ciclo 10c

Interior do meio filtrante (aproximadamente 500 μm da superfície do tecido)

Figura 4.72: Seção transversal do Acrílico filtrando rocha grossa, em diferentes ciclos, 100 mmH₂O.

Tabela 4.41: Penetração de partículas de rocha grossa no Acrílico: diâmetro de partículas com a profundidade do tecido.

Diâmetro de partículas (μm)												
Profundidade (μm)	Ensaio											
	1				5				10			
0-107	9,727	10,127	9,768	9,347	2,042	1,734	1,917	1,951	2,604	2,610	2,930	2,664
107-214	8,095	8,405	6,208	7,717	1,624	1,559	1,231	1,748	1,975	3,047	4,415	3,644
214-321	6,701		7,148	8,077	2,306	2,368	3,756	2,151	3,748	2,547	3,403	3,831
321-428	6,583		6,963	7,026	1,613	2,731	2,821	2,241	2,668	1,335	3,378	3,420
428-535	6,764		6,733	5,728	2,872	2,319	2,809	1,598	2,823	3,402		3,469
535-642	6,140			6,017	2,483	-	2,266	2,262	2,031			2,477
642-749					2,635	2,046	1,238	2,441				4,184
749-856					2,384	4,051	5,270	2,095				4,226
856-963					2,260	3,318	1,759	2,829				9,019
963-1070						1,449	2,887	3,311				
1070-1177						3,529		2,478				
1177-1284						2,873		2,590				
1284-1391						3,764		2,857				
1391-1498								4,802				
1498-1605								3,986				
Profundidade média (μm)	508,25				1.257,25				642			

Tabela 4.42: Desvio padrão do diâmetro de partículas de rocha grossa em cada camada analisada do Acrílico.

Desvio Padrão												
Profundidade (μm)	Ensaio											
	1				5				10			
0-107	8,190	11,5825	9,93675	8,38226	2,64337	1,87737	2,11457	2,21755	2,53492	2,51317	3,01432	2,25399
107-214	5,329	6,11016	1,88196	4,5354	2,06252	1,80935	1,43564	2,64487	3,007	4,76616	5,31938	3,26811
214-321	3,392		3,72017	10,8695	2,71971	2,68611	3,91349	2,7231	4,39711	4,04812	4,16051	5,06875
321-428	2,804		3,01512	2,52526	1,63271	3,2348	2,82841	2,40318	2,91404	1,25341	2,7614	4,40941
428-535	3,5626		5,37292	2,36662	2,94521	1,97967	3,03501	1,63501	3,1072	3,73075		4,72678
535-642	2,30595			2,35227	2,87492	0	2,94184	2,92798	2,69564			3,37612
642-749					2,71544	0,80257	0,87481	2,66478				5,76263
749-856					2,03999	3,72114	2,57641	2,56748				2,92047
856-963					2,31634	3,47797	1,97236	2,83185				8,4697
963-1070						2,35763	3,24766	4,37043				
1070-1177						3,21343		2,85312				
1177-1284						3,08887		3,31702				
1284-1391						1,37072		3,98601				
1391-1498								5,91409				
1498-1605								4,77822				

A partir da Figura 4.73 pode-se verificar a variação do número de partículas com cada camada analisada de tecido.

Observa-se que não há tendência do número de partículas coletada em cada camada aumentar ou diminuir com o número de ciclos, sendo que o máximo de partículas retidas foi de cerca de 750.

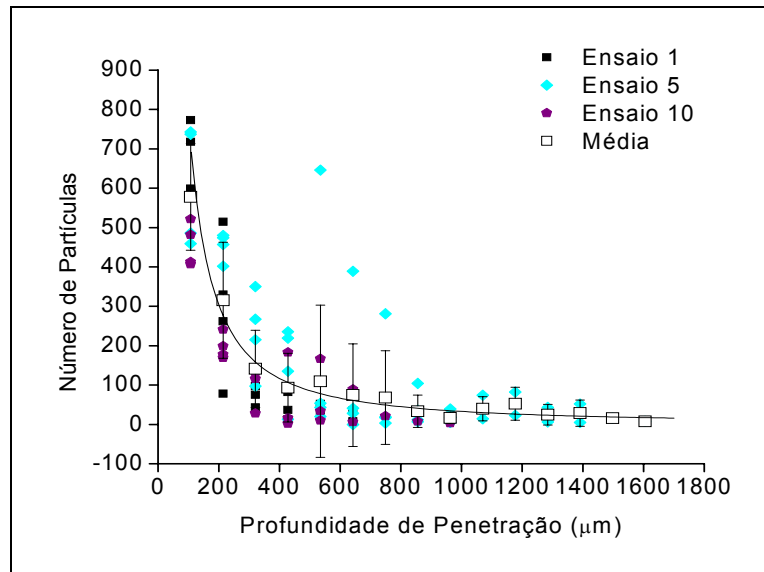


Figura 4.73: Variação do número de partículas com o número de ciclos para o Acrílico filtrando rocha grossa.

A Tabela 4.43 expressa os valores do número de partículas com a profundidade de penetração e com o número de ciclos.

Tabela 4.43: Valores do número de partículas retidas em cada camada do Acrílico e rocha grossa com ΔP máx de 100 mmH₂O.

Número de partículas												
Profundidade (μm)	Ensaio											
	1				5				10			
0-107	718	773	595	599	486	737	743	459	522	482	407	413
107-214	330	515	78	262	457	480	474	402	241	178	169	199
214-321	97		75	43	215	267	97	350	28	116	132	132
321-428	82		37	13	13	235	219	135	90	16	2	183
428-535	52		47	23	20	43	54	646	34	10		167
535-642	35			8	28	0	41	389	6			89
642-749					19	3	17	281				21
749-856					12	36	7	104				8
856-963					18	18	5	39				3
963-1070						32	14	74				
1070-1177						23		82				
1177-1284						6		43				
1284-1391						5		52				
1391-1498								16				
1498-1605								8				
Soma	1.314	1.288	832	948	1.268	1.885	1.671	3.080	921	802	710	1.215

4.12 COMPARAÇÃO ENTRE A FILTRAÇÃO COM PARTÍCULAS DE TAMANHOS DIFERENTES

Comparando o Ensaio 10 dos experimentos com as rochas de diferentes diâmetros em Acrílico, verifica-se, pela Figura 4.74, que a duração dos ciclos de filtração são significativamente superiores para a rocha grossa, bem com o seu período de filtração interna, o que se refletiu nos valores de massa coletada, apresentados na Tabela 4.44. Deste modo, como ocorreu para os experimentos com polvilho, fica claro que o período de filtração interna não é dependente apenas da abertura superficial do tecido, ou de suas características estruturais (como a porosidade e permeabilidade, analisadas neste trabalho), mas também das características da partícula a ser capturada.

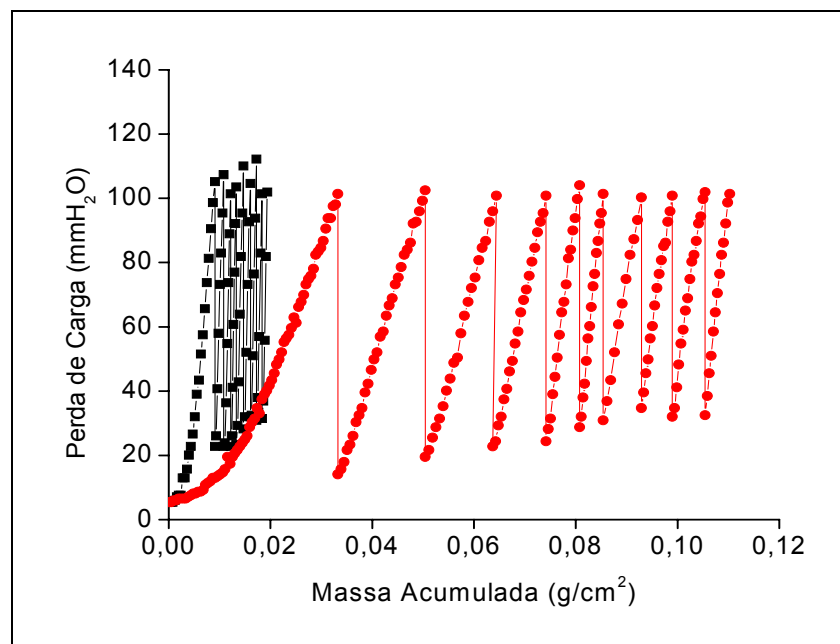


Figura 4.74: Curvas comparativas do Ensaio 10 da rocha fosfática com diferentes diâmetros e 100 mmH₂O. (!) Rocha fosfática fina; (.) Rocha fosfática grossa.

Esta observação é confirmada também pela verificação do ponto de colmatação, muito maior para a rocha grossa pela Tabela 4.45.

Fica claro também que a distribuição granulométrica ou a forma podem não ser os fatores determinantes, mas sim o diâmetro médio propriamente dito, uma vez que a rocha grossa possui uma distribuição granulométrica, tão ampla como a rocha fina.

Tabela 4.44: Comparação dos valores de massa média coletada em cada ciclo para os experimentos com Acrílico com as rochas grossa e fina, 100 mm H₂O.

Ciclo	Massa (g/cm²)	
	Rocha fina	Rocha grossa
1	0,0082	0,0327
2	0,0019	0,0180
3	0,0013	0,0132
4	0,0013	0,0101
5	0,0012	0,0085
6	0,0013	0,0046
7	0,0011	0,0075
8	0,0011	0,0061
9	0,0010	0,0062
10	0,0010	0,0047

Tabela 4.45: Ponto de colmatação médio determinado para cada os ensaios de cada tecido estudado.

Ensaio	Ponto de colmatação (g/cm²)
AC e rocha fina	0,00310
AC e rocha grossa	0,00982

No entanto, a massa coletada tendeu a se tornar constante para rocha fina, o que não foi observado para a rocha grossa. Provavelmente, não houve a saturação do conjunto torta-tecido para este tipo de material, durante os dez ciclos de filtração.

Assim, pode-se afirmar que o maior diâmetro de partículas resultou em uma melhor acomodação tanto interna (refletida no maior tempo de filtração interna) quanto superficial da torta, uma vez que a resistência específica da torta de partículas grossas foi inferior àquela apresentada pela torta constituída por partículas finas, como pode ser observado pela Figura comparativa 4.75, pelo menos no que se refere aos dez ciclos analisados.

Essa influência do diâmetro era prevista na literatura, sendo citado que as partículas maiores efetuam um recobrimento menos eficiente da superfície das fibras, resultando em uma menor perda de carga (REMBOR e KASPER, 1996; AGUIAR e COURY, 1996).

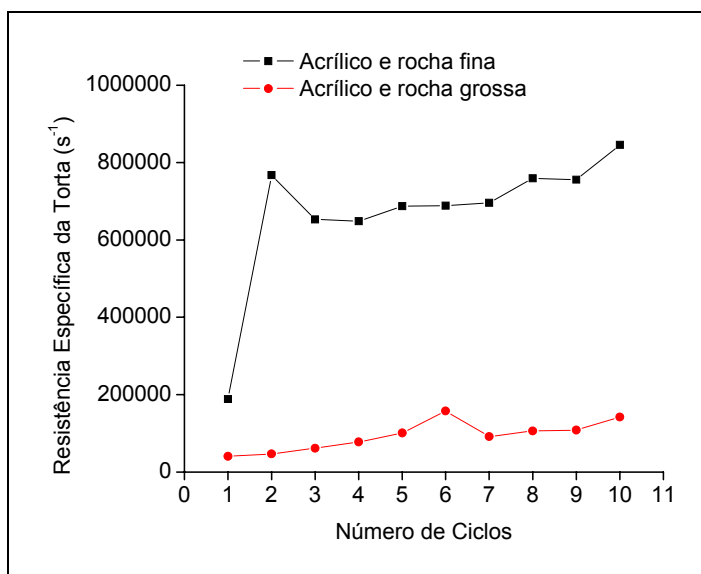


Figura 4.75: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha grossa e rocha fina.

Do mesmo modo como para a massa coletada, era de se esperar que o comportamento da massa retida acumulada e a removida apresentadas pelas curvas médias da Figura 4.76 não fossem constantes. Verifica-se novamente que para a rocha fina os valores em questão se tornaram constantes logo nos primeiros ciclos, sendo que para a rocha grossa, não foi atingida a constância no comportamento.

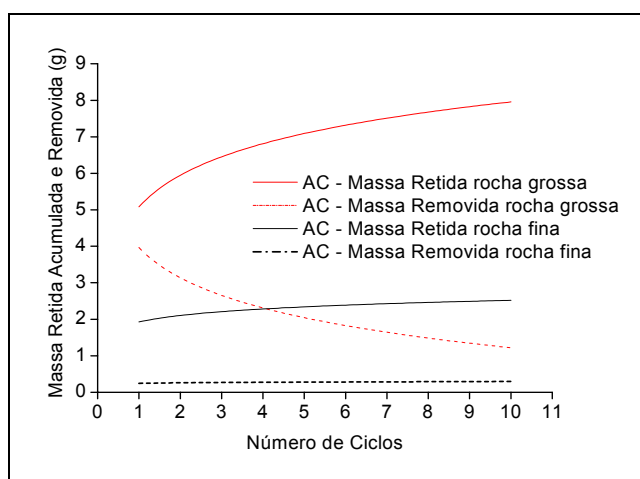


Figura 4.76: Massa de material pulverulento removida e retida acumulada para a rocha fina e grossa em Acrílico.

A Tabela 4.46 ilustra, em termos numéricos, o comportamento das massas removida e retida acumulada.

Tabela 4.46: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os materiais analisados.

Ciclo	Massa Removida (g)		Massa Retida Acumulada (g)	
	Rocha Fina	Rocha Grossa	Rocha Fina	Rocha Grossa
1	0,24	4,02	1,89	4,45
2	0,23	3,27	2,09	5,55
3	0,21	2,83	2,22	6,27
4	0,22	2,45	2,32	6,49
5	0,28	1,35	2,34	6,81
6	0,25	1,77	2,36	7,14
7	0,28	1,74	2,38	7,32
8	0,28	1,42	2,42	7,44
9	0,27	1,46	2,52	7,62
10	0,25	1,32	2,67	7,84

Para a rocha fosfática grossa em acrílico, pode-se verificar que o acúmulo de material foi mais acentuado quando comparado com os ensaios com rocha fina, ou seja, o material de maior diâmetro apresentou maior retenção de material. No entanto, esperava-se que, por serem maiores, as partículas ficassem mais na superfície do filtro, formando uma torta mais espessa e de mais fácil remoção, e, portanto, a massa retida fosse menor. Porém o que mostra a Figura 4.77 é que, nos ensaios com a rocha grossa, de modo geral, mais partículas ficaram retidas nas camadas analisadas, correspondendo à maior massa retida.

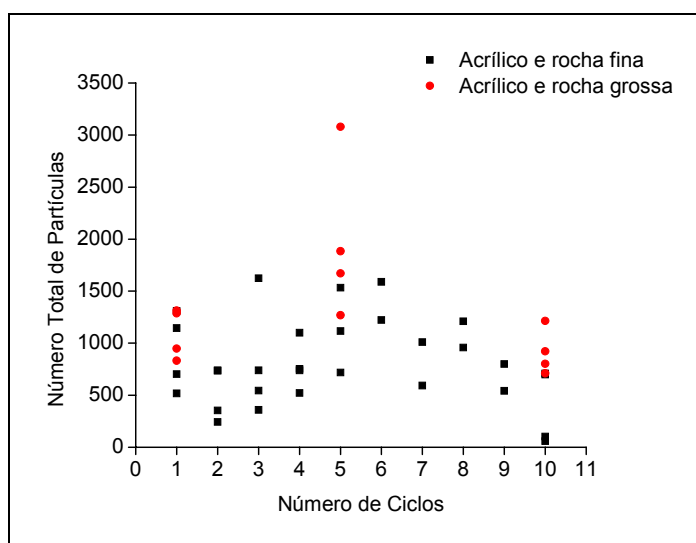


Figura 4.77: Número total de partículas coletadas em cada coluna analisada para rocha fina e grossa em Acrílico.

Pode ser que a ação do mecanismo difusional nos experimentos com a rocha grossa seja menos eficiente, favorecendo uma competição entre os mecanismos de interceptação e impactação, como ocorreu para o polvilho. Desta forma, a ação de mecanismos simultâneos (impactação, interceptação) pode ter resultado em uma menor eficiência de coleta da rocha grossa.

Avaliando-se o mecanismo de captura predominante em cada caso, tem-se, pela Tabela 4.47 que o número de Stokes é muito maior que R para os ensaios com a rocha grossa, indicando a predominância do mecanismo de impactação inercial, sendo, porém ambos os valores muito maiores que para os ensaios com rocha fina, confirmando que neste caso, pode não haver interferência significativa do mecanismo difusional. Da mesma forma, os baixos valores de St e R dos experimentos com rocha fina indicam que pode haver ação significativa do mecanismo de coleta difusional, com explicado anteriormente, e sugerido pela observação de resquícius de dendritos ao redor das fibras nas microfotografias.

Tabela 4.47: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis.

Experimento		AC	AC
Material		Rocha fina	Rocha grossa
d_f (10^4 cm)		22,7	22,7
d_p Stokes (10^4cm)		3,71	14,67
Adimensional calculado	St	0,51	8,88
	R	0,16	0,65
	Pe	337.885	1.380.464
d_p méd. vol. (10^4cm)		4,55	41,47
Adimensional calculado	St	0,78	70,99
	R	0,20	1,83
	Pe	417.707	3.930.959
d_p St calc (10^4cm)		2,74	16,30
Adimensional calculado	St	0,32	10,97
	R	0,18	0,72
	Pe	245.796	1.535.577

Também a ser posteriormente confirmado, o fato da massa retida ter sido superior para a rocha grossa pode indicar que as partículas grossas penetrem mais profundamente no tecido, e sejam mais difíceis de serem removidas que as partículas de

rocha fina, o que poderia ser justificado por uma competição entre a impactação e a interceptação, que resultaria em uma diminuição da eficiência de captura.

A diminuição da massa removida para a rocha grossa, associada à tendência crescente da massa retida acumulada indica que há uma deterioração da eficiência de remoção de torta, observada também nos experimentos com polvilho em poliéster tratado, e conseqüentemente um incremento da perda de carga residual um pouco mais expressivo que para a rocha fina, como mostra a Figura 4.78, considerando-se as massas significativamente maiores nos experimentos com a rocha grossa.

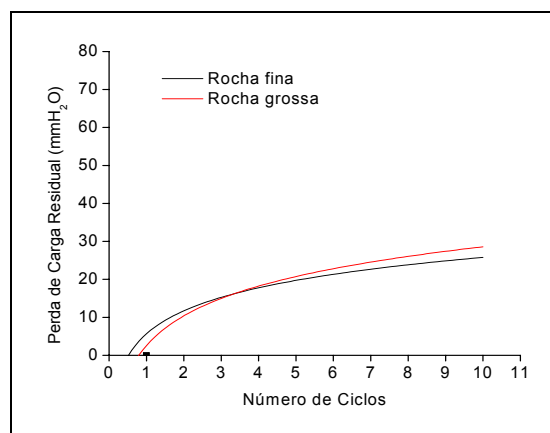


Figura 4.78: Perfil da variação de perda de carga residual média de cada ciclo de filtração para a rocha fina e grossa em Acrílico.

Assim, no caso da rocha grossa, a perda de carga residual foi apenas ligeiramente superior à dos ensaios com a rocha fina, a despeito da maior massa retida, o que pode indicar que a forma das partículas tenha relevância neste aspecto da filtração, no sentido de que formas geométricas semelhantes provoquem perdas de carga residuais semelhantes por causa do mesmo arranjo interno. Outra possibilidade é a de que partículas de maiores diâmetros tenham menos efeito na perda de carga residual do que partículas de diâmetros menores, o que já foi relatado na literatura, já que o número de partículas presentes nas amostras com rocha grossa foi superior. A Tabela 4.48 apresenta o perfil de aumento da perda de carga residual para o Ensaio 10 de ambos os experimentos.

A Figura 4.79 apresenta as curvas do Ensaio 10 para a rocha fina e a rocha grossa, relativas à perda de carga residual e à massa retida acumulada. Verifica-se que a maior massa retida nos ensaios com a rocha grossa resultou em maior perda de carga residual.

Tabela 4.48: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os materiais analisados.

Ciclo	Rocha Fina	Rocha Grossa
1	0	0
2	17,35	14,09
3	17,35	19,52
4	17,35	22,77
5	17,89	24,10
6	22,77	28,73
7	26,57	30,90
8	25,48	34,70
9	25,48	31,99
10	26,02	32,53

Porém, a exemplo do que apresentaram os resultados anteriores, a massa retida e a perda de carga residual resultante não são proporcionais, quando se compara os dois experimentos, ou seja, uma massa x de rocha fina provoca uma perda de carga y diferente da perda de carga residual provocada pela mesma massa x de rocha grossa.

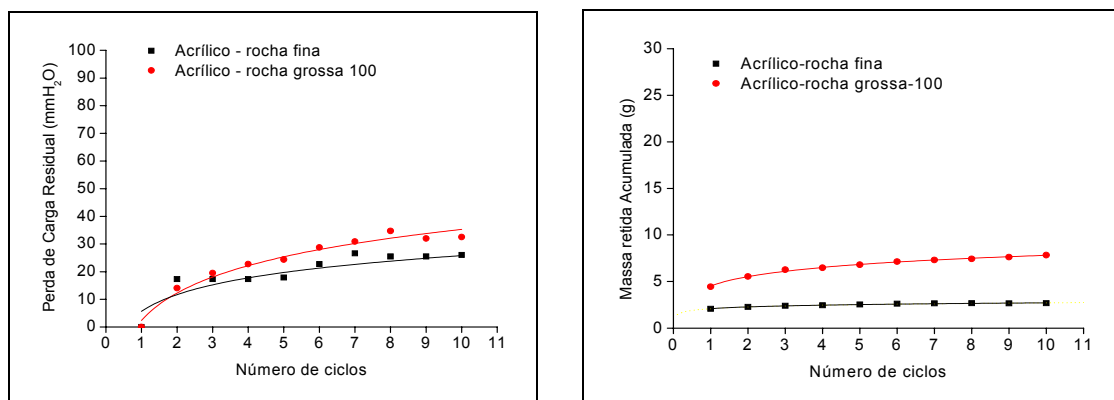


Figura 4.79: Gráfico comparativo do Ensaio 10 de cada tecido para a rocha fina e grossa em acrílico.

Este comportamento pode ser melhor observado através da Figura 4.80, que ilustra a relação entre a massa retida e a perda de carga residual para cada experimento. Verifica-se que para a rocha fina, o incremento da perda de carga inicial de cada ciclo provocado por uma mesma massa residual foi muito maior que na rocha grossa, por exemplo, para atingir uma perda de carga residual de 25 mmH₂O nos ensaios com rocha fina, foi necessário acumular pouco mais de 2,0 gramas, enquanto que no caso da rocha grossa, a massa residual foi maior que 6,0 gramas. Este fato se deve à colmatção mais rápida provocada por partículas menores no meio filtrante no ciclo inicial, e à maior

perda de carga resultante da filtração com partículas menores, como descrito na literatura.

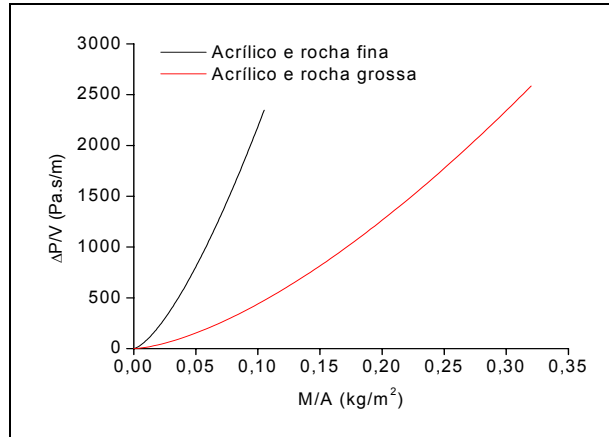


Figura 4.80: Variação da perda de carga residual com a massa retida acumulada para os experimentos com Acrílico e rochas fina e grossa, até 100 mmH₂O

Deste modo fica explícito que partículas de menor diâmetro conferem perda de carga e resistência maior ao escoamento de fluido, mas formam uma torta que tende a alcançar a estabilidade mais rapidamente que as filtrações com materiais mais grosseiros, apesar deste apresentar menor resistência específica.

Como comentado anteriormente, o comportamento constante ou não das massas nos experimentos com rocha grossa se refletiu na manutenção ou deterioração da eficiência de remoção, sendo que nos últimos ciclos da rocha grossa os valores foram próximos aos apresentados pela rocha fina, como mostra a Figura 4.81.

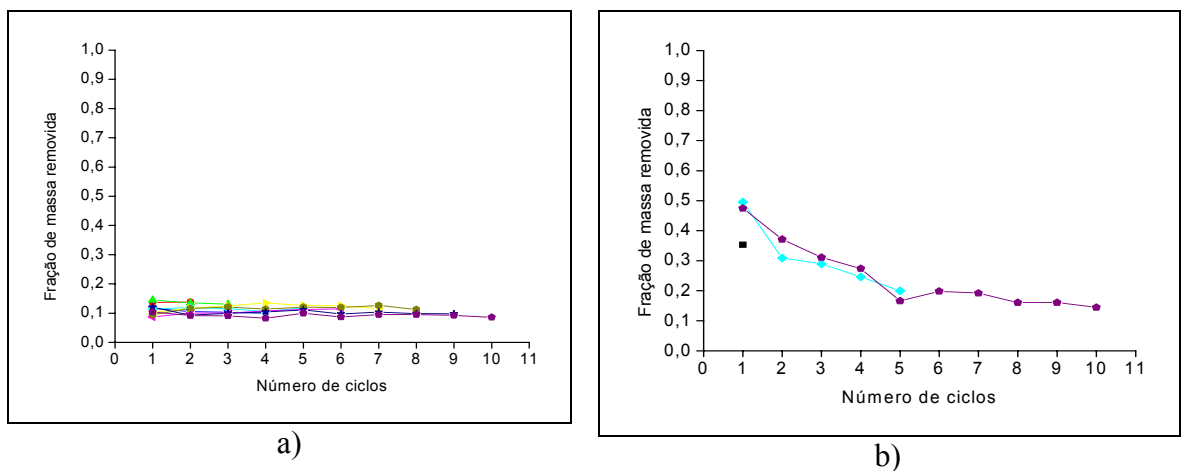


Figura 4.81: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para: a) AC e rocha fina, b) AC e rocha grossa (!) Ensaio 01; (,) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (Λ) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06; (β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

A diferença de massas retida acumulada e seus efeitos sobre os ciclos de filtração podem ser observados também a partir da análise de penetração no interior do tecido. A Figura 4.82 mostra que, na média, a intensidade de penetração (número de partículas por camada) foi ligeiramente superior nos experimentos com a rocha grossa, sendo o desvio padrão também superior para a rocha grossa nas camadas intermediárias, o que indicou uma variabilidade maior do número de partículas no interior do filtro.

Como observado para o polvilho, as partículas maiores alcançaram também uma profundidade de penetração maior. Para a rocha grossa também não foi observada a presença de partículas o redor das fibras, como na rocha fina, mas sim dispersas no seio do tecidos, com ocorreu para o polvilho. Essa maior penetração indica uma deterioração da eficiência de captura de partículas, o que confirma a teoria de competição entre os mecanismos de interceptação e impactação para este caso.

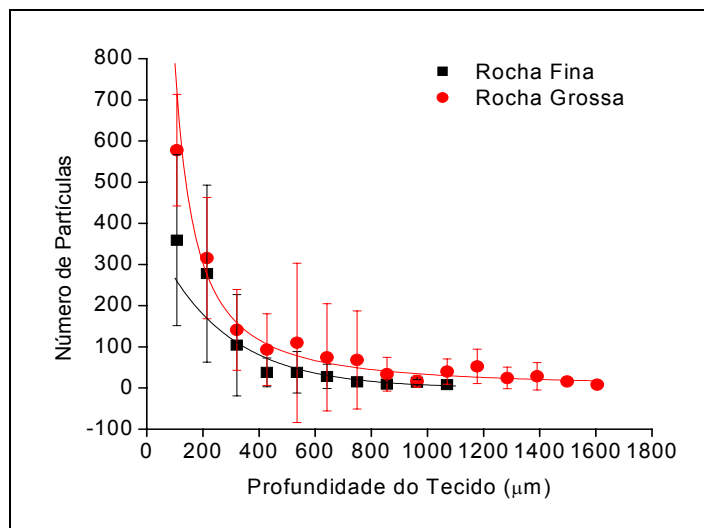


Figura 4.82: Variação do número médio de partículas em função da profundidade de penetração para a rocha fina e a rocha grossa em acrílico, com o desvio padrão.

Outra explicação para a menor profundidade de penetração da rocha fina vem da observação da permanência de resquílios de dendritos ao redor das fibras, sugere que a formação dos dendritos em uma camada mais superficial pela rocha fina e que pode ter impedido que mais partículas se alojassem no interior do meio filtrante, mas é uma possibilidade mais difícil de ser comprovada experimentalmente.

A variação do diâmetro médio de partículas para cada camada analisada de ambos os experimentos pode ser visualizada pela Figura 4.83.

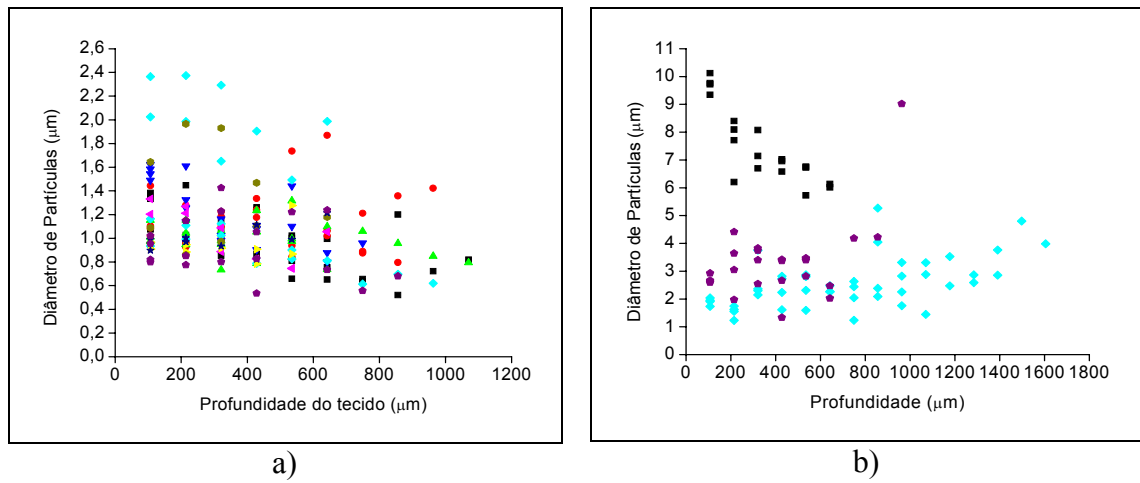


Figura 4.83: Comparação entre da variação dos diâmetros médios dos experimentos com rocha fina (a) e grossa (b) em Acrílico. (!) Ensaio 01; (,) Ensaio 02; (7) Ensaio 03; (B) Ensaio 04; (Δ) Ensaio 05; (Ω) Ensaio 06; (β) Ensaio 07; (μ) Ensaio 08; (ξ) Ensaio 09; (□) Ensaio 10.

Nos dois casos, não se pode afirmar que houve tendência definida de aumento ou diminuição do diâmetro com a profundidade, pois em alguns ensaios a tendência foi de aumento e em outros foi de diminuição. Da mesma forma, não houve tendência da profundidade variar ciclo a ciclo, como pode ser melhor observado na Figura 4. 84.

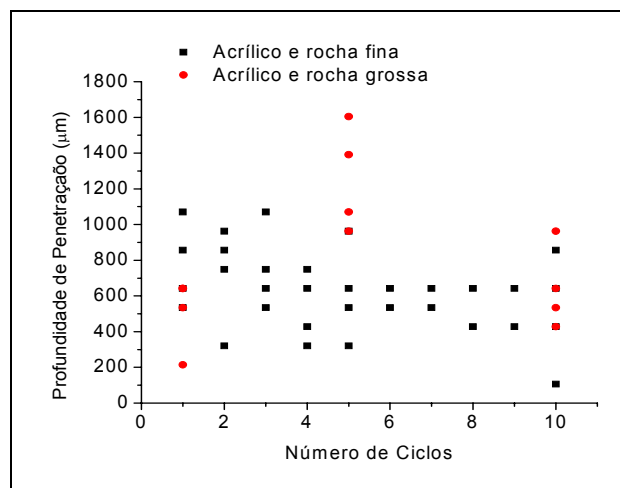


Figura 4.84: Profundidade de penetração com o número de ciclos para cada coluna analisada do Acrílico com rocha grossa e fina.

No entanto, REMBOR e KASPER (1996) descreveram um maior grau de penetração para partículas menores, o que não foi observado neste trabalho.

4.13 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO – ACRÍLICO E ROCHA GROSSA $\Delta P_{MAX} = 300 \text{ mmH}_2\text{O}$

A avaliação dos efeitos do aumento da perda de carga máxima determinada para as filtrações foi realizada para o acrílico filtrando rocha grossa, por serem as partículas de observação mais fácil. Deste modo, poder-se-á avaliar também seus efeitos na profundidade e intensidade de penetração. A Figura 4.85 apresenta os experimentos realizados com a rocha grossa em filtrações cuja perda de carga máxima foi fixada em 300 mmH₂O.

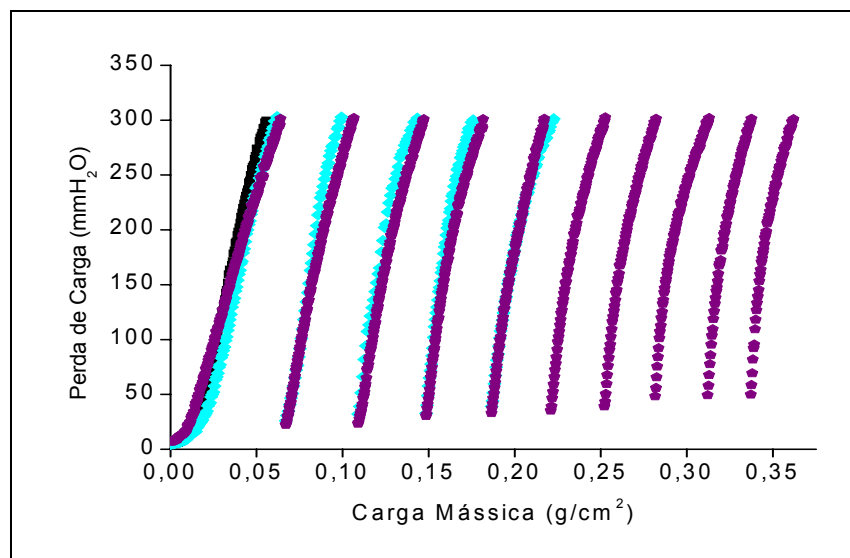


Figura 4.85: Perfil da perda de carga para os dez ciclos de filtração para o acrílico com a rocha grossa, 300 mmH₂O. (!) Ensaio 01; (A) Ensaio 05; (□) Ensaio 10.

Verifica-se que o comportamento em “S” das curvas são mais visíveis neste caso e com curvas mais uniformes.

No entanto, este comportamento em “S” parece lembrar ainda as curvas do primeiro ciclo, mas sem o período de filtração interna, apenas com a declinação final, com apresentado nos resultados preliminares.

A observação da Tabela 4.49 indica que a estabilização da massa coletada em cada filtração começa a ocorrer após quinto ciclo, aproximadamente.

Tabela 4.49: Massa coletada em cada ciclo para os experimentos com Acrílico e rocha grossa a 300 mmH₂O.

Ciclo	Massa (g/cm ²)
1	16,262
2	10,066
3	9,726
4	8,436
5	7,808
6	8,042
7	7,610
8	7,953
9	6,437
10	6,322

A torta formada em cada ciclo apresentou, por sua vez, valores crescentes de resistência efetiva a cada ciclo, sem apresentar tendência a se tornarem constantes, como ilustra a Tabela 4.50.

Tabela 4.50: Resistência específica média da torta determinada graficamente, para os ensaios com Acrílico e rocha grossa 300 mmH₂O.

Ciclo	K ₂ (s ⁻¹)	Desvio padrão
1	6,4.10 ⁴	9,7.10 ³
2	9,4.10 ⁴	1,8.10 ⁴
3	9,6E.10 ⁴	1,0.10 ⁴
4	1,2.10 ⁵	1,6.10 ⁴
5	1,2.10 ⁵	2,9.10 ³
6	1,1.10 ⁵	-
7	1,2.10 ⁵	-
8	1,7.10 ⁵	-
9	1,7.10 ⁵	-
10	2,0.10 ⁵	-

Ao contrário do comportamento tendendo à constância apresentado pela massa coletada, as massas retida acumulada e removida apresentaram comportamento crescente e decrescente, respectivamente, como apresenta a Figura 4.86.

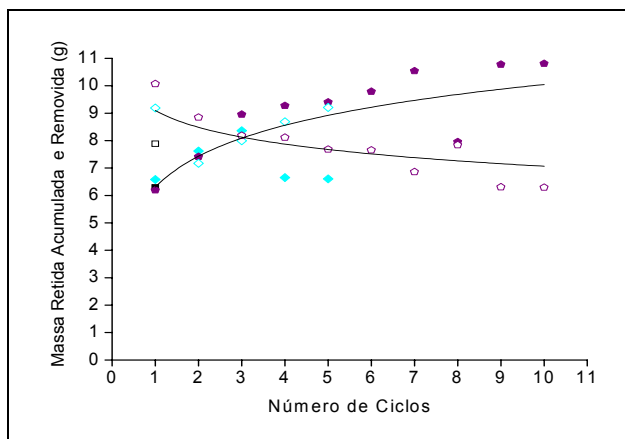


Figura 4.86: Massa de material pulverulento removida pela limpeza (**símbolos vazios**) e retida após a mesma (**símbolos cheios**) para o Acrílico filtrando rocha grossa, 300 mmH₂O. (∇) Ensaio 01; (AM) Ensaio 05; (□) Ensaio 10.

A perda de carga residual resultante deste acúmulo de partículas no conjunto torta-tecido está apresentada na Figura 4.87.

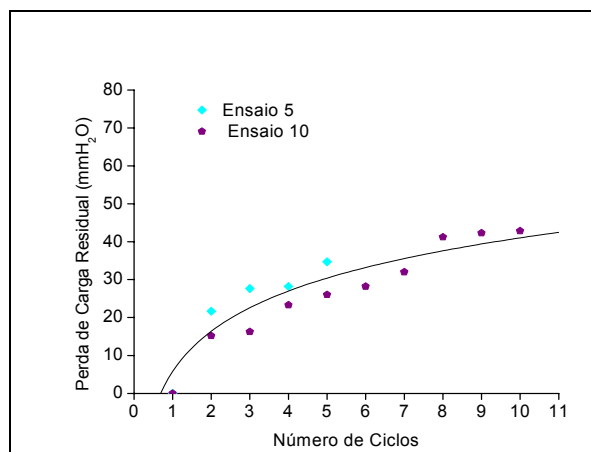


Figura 4.87: Perfil da variação da perda de carga residual com o número de ciclos para os experimentos de AC com rocha grossa e 300mmH₂O.

Verifica-se que inicialmente a perda de carga apresenta tendência crescente, mas nos ciclos finais permanece praticamente constante.

A relação entre a perda de carga residual e a massa retida acumulada pode ser melhor visualizada pela Figura 4.88.

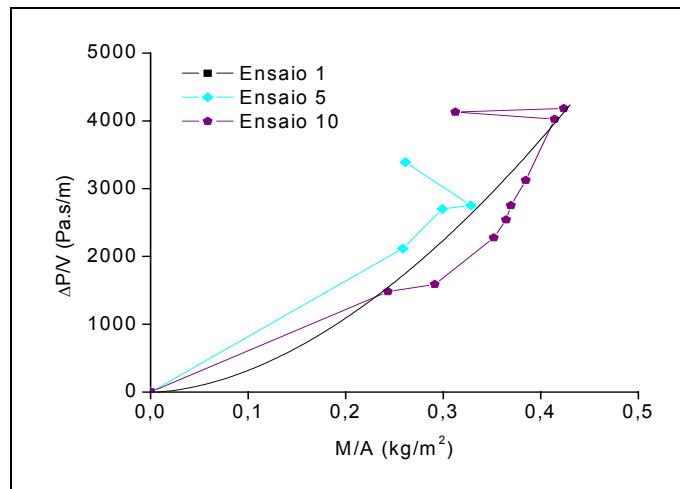


Figura 4.88: Variação da perda de carga residual com a massa retida acumulada para o AC com rocha grossa até 300mmH₂O.

Verifica-se que o incremento de massa resultou em um aumento da perda de carga residual, como nos demais experimentos, sendo que em alguns ciclos, este comportamento se desviou, provavelmente por algum erro experimental não determinado. O aumento da perda de carga residual com a massa retida acumulada pode ser expresso pela equação 4.10:

$$\frac{\Delta P}{V} = 18898 \cdot \left(\frac{M_{\text{ret}}}{A} \right)^{1,77} \quad (4.10)$$

A eficiência de remoção resultante das limpezas realizadas pode ser visualizada na Figura 4.89.

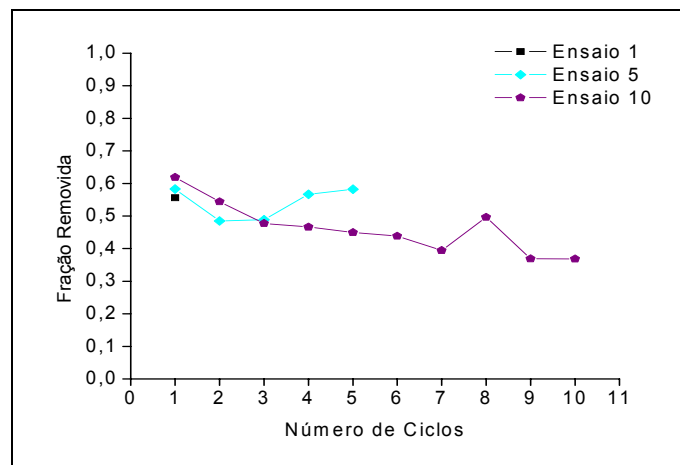


Figura 4.89: Perfil da fração de massa removida da torta, após a limpeza para o Acrílico e rocha grossa, 300 mmH₂O.

As imagens obtidas via MEV, de alguns ciclos dos ensaios aqui tratados estão apresentadas na Figura 4.90.

A Tabela 4.51 apresenta a variação do diâmetro de partículas com a profundidade de penetração e como número de ciclos para cada camada de tecido analisada.

A Tabela 4.52 mostra o desvio padrão destes dados de diâmetro para a rocha grossa em Acrílico.

Pode-se verificar pela Tabela 4.51 que a profundidade média variou entre cerca de 1.000 e 1.950 μm , com tendência de aumentar o número de ciclos.

No entanto, essa tendência deve ser confirmada pela realização de mais experimentos, podendo ser um caso isolado ocorrido para o experimento 10, ou realmente expressar uma tendência.

O diâmetro de partículas, por sua vez, não apresentou tendência definida de aumentar ou diminuir com a profundidade do tecido ou com o número de ciclos.

Interface torta-ar

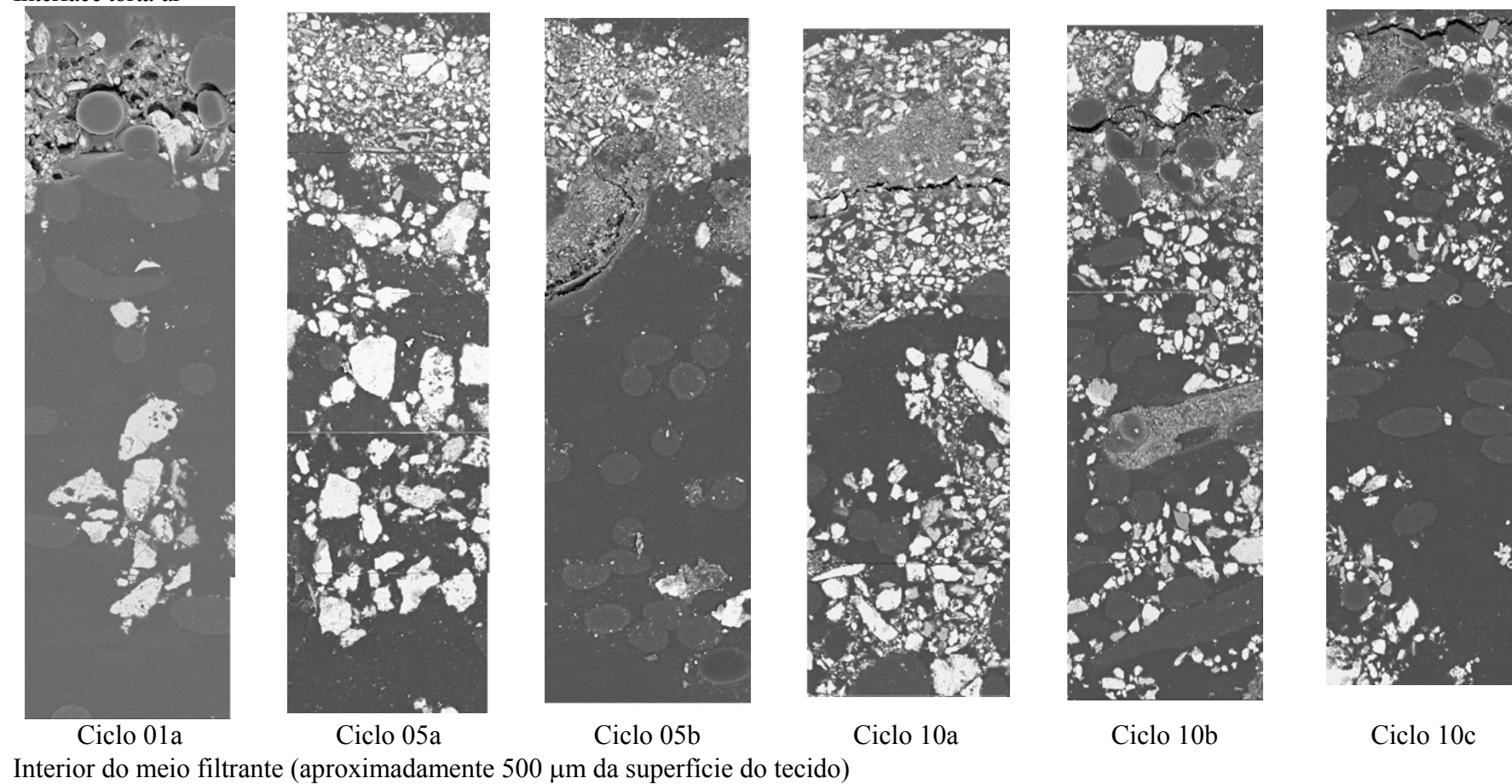


Figura 4.90: Seção transversal do Acrílico filtrando rocha grossa até 300 mmH₂O, em diferentes ciclos.

Tabela 4.51: Penetração de partículas de rocha grossa em Acrílico: diâmetros de partículas com a profundidade do tecido.

Profundidade (μm)	Diâmetro de partículas (μm)											
	Ensaio											
	1				5				10			
0-107	13,414	12,091	-	12,719	16,062	13,049	11,528	15,185	1,467	10,806	1,726	1,680
107-214	23,428	13,207	20,687	23,094	18,468	19,618	12,449	14,028	2,003	10,686	2,178	2,648
214-321	15,887	26,956	27,188	30,738	19,964	25,064	13,998	15,205	2,883	16,387	3,238	2,031
321-428	14,949	24,747	25,742	22,473	21,144	7,805	8,143	13,116	2,931	21,152	2,702	2,965
428-535	7,270	30,338	12,585	-	18,697	14,244	23,709	9,286	2,675	20,888	3,552	3,266
535-642	8,101	8,094	9,292	-	17,413	26,338	8,966	7,137	2,702	15,813	3,960	3,285
642-749	5,639	23,881	13,367	25,116	14,876	-	-	7,859	2,955	22,583	3,871	3,692
749-856	21,392	28,694	42,120	18,039	31,349	16,737	6,683	9,669	3,362	24,284	4,034	3,545
856-963	20,069	24,280	48,057	30,472	17,630	22,407	7,254		3,766	5,275	3,151	3,462
963-1070	13,812	16,704	43,211	30,218	14,084	10,275	7,900		3,426	-	4,193	6,253
1070-1177			15,116						2,879	0,974	1,400	2,167
1177-1284									4,334	2,712	4,687	3,155
1284-1391									4,004	4,837	3,652	-
1391-1498									1,242	5,677	2,963	2,648
1498-1605									4,259	3,989	4,459	4,844
1605-1712										1,537	3,259	1,785
1712-1819										4,886	5,340	3,109
1819-1926										9,503	2,819	5,129
1926-2033										-	1,281	
2033-2140										4,243		
2140-2247										1,490		
Profundidade média (μm)	1.096,75				1.016,5				1.952,75			

Tabela 4.52: Desvio padrão do diâmetro de partículas da rocha grossa em Acrílico filtrando até 300 mmH₂O.

Profundidade (μm)	Desvio Padrão											
	Ensaio											
	1				5				10			
0-107	15,419	11,206	0	15,216	15,61	12,93	10,823	15,415	1,7697	10,342	2,5869	2,075
107-214	32,62	13,912	24,544	31,489	23,696	18,872	13,849	17,044	2,2243	11,107	2,5291	2,6545
214-321	21,221	49,241	32,195	39,487	37,24	24,78	7,2426	22,304	3,3891	16,004	3,3127	2,1407
321-428	14,674	38,408	30,884	19,682	29,674	2,7326	6,372	20,869	2,9419	22,324	3,777	3,0054
428-535	4,5047	42,155	3,8582	0,000	33,373	13,893	41,731	10,335	3,5492	23,34	3,3458	4,1223
535-642	3,9582	3,9173	5,4016	0,000	28,905	31,141	4,1019	3,3899	2,9636	16,956	4,1494	3,3461
642-749	0,8564	26,338	0,000	22,151	26,975	22,302	0,000	4,137	3,0573	35,088	3,7801	4,2179
749-856	37,818	25,631	69,79	17,823	39,116	18,051	3,9517	9,7251	3,1811	0,000	4,233	4,0953
856-963	23,832	0,000	34,735	39,948	25,369	3,8848	5,5241		3,508	0,766	2,0646	4,3289
963-1070	14,507	14,691	22,608	27,043	15,492	0	4,6597		3,6649	0,000	5,0917	2,9469
1070-1177			14,076						2,498	0,3416	0,955	1,9016
1177-1284									3,7791	2,4516	5,6723	4,612
1284-1391									3,5364	5,3328	3,4784	0,000
1391-1498									0,6592	5,1865	3,295	2,7418
1498-1605									5,0564	2,9483	4,4151	4,1391
1605-1712										0,6302	3,3381	14,116
1712-1819										3,7881	7,4325	3,3549
1819-1926										5,4399	3,7437	1,5508
1926-2033										0,000	0,6406	
2033-2140										4,9894		
2140-2247										2,1055		

A partir da Figura 4.91 pode-se verificar a variação do número de partículas com cada camada analisada de tecido, observa-se que não há tendência do número de partículas coletada em cada camada aumentar ou diminuir com o número de ciclos, sendo que o máximo de partículas retidas foi de cerca de 800.

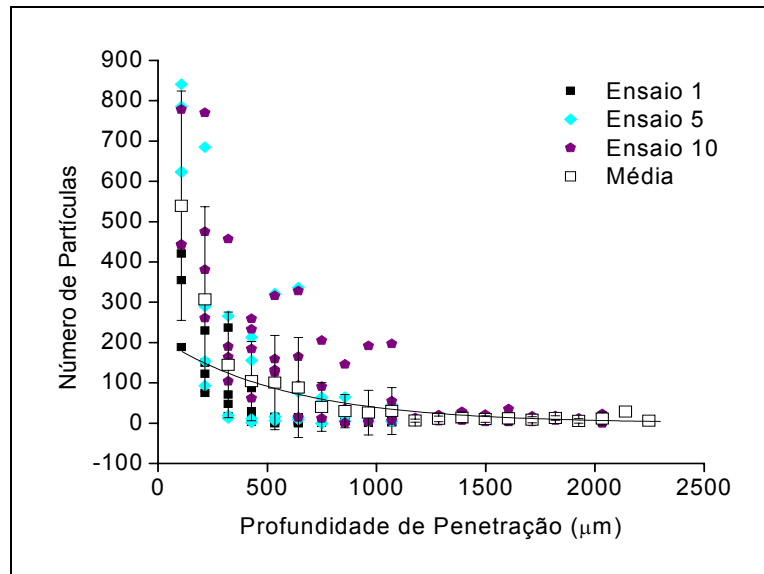


Figura 4.91: Variação do número de partículas com o número de ciclos para o Acrílico filtrando rocha grossa até 300 mmH₂O.

Em termos numéricos, esse comportamento pode ser acompanhado pela Tabela 4.53.

Tabela 4.53: Valores do número de partículas retidas em cada camada do Acrílico e rocha grossa, até 300 mmH₂O.

Profundidade (μm)	Número de partículas											
	Ensaio											
	1				5				10			
0-107	421	189	0	355	623	785	841	624	972	778	443	443
107-214	230	75	150	123	290	93	154	685	770	381	475	261
214-321	237	18	48	71	153	19	13	266	190	457	164	104
321-428	30	87	3	13	213	2	11	156	233	259	184	62
428-535	13	16	5	0	99	6	16	321	316	159	126	132
535-642	15	4	7	0	77	14	9	336	328	94	14	165
642-749	6	4	1	5	54	0	0	64	205	12	43	91
749-856	8	4	6	6	5	17	34	65	146	1	34	36
856-963	4	1	2	14	13	4	13		192	4	26	17
963-1070	8	3	2	9	5	4	45		197	0	55	6
1070-1177			5						13	6	5	4
1177-1284									6	20	5	12
1284-1391									21	7	28	0
1391-1498									3	21	11	6
1498-1605									35	4	5	3
1605-1712										5	3	17
1712-1819										7	18	14
1819-1926										3	12	2
1926-2033										0	23	
2033-2140										29		
2140-2247										6		
Soma	972	401	229	596	1532	944	1136	2517	3627	2203	1618	1342

4.14 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO – COMPARAÇÃO ENTRE FILTRAÇÕES COM DIFERENTES PERDAS DE CARGA MÁXIMA

As curvas seqüenciais das filtrações do ensaio 10 com a rocha grossa até 100 mmH₂O e até 300 mmH₂O estão apresentadas na Figura 4.92.

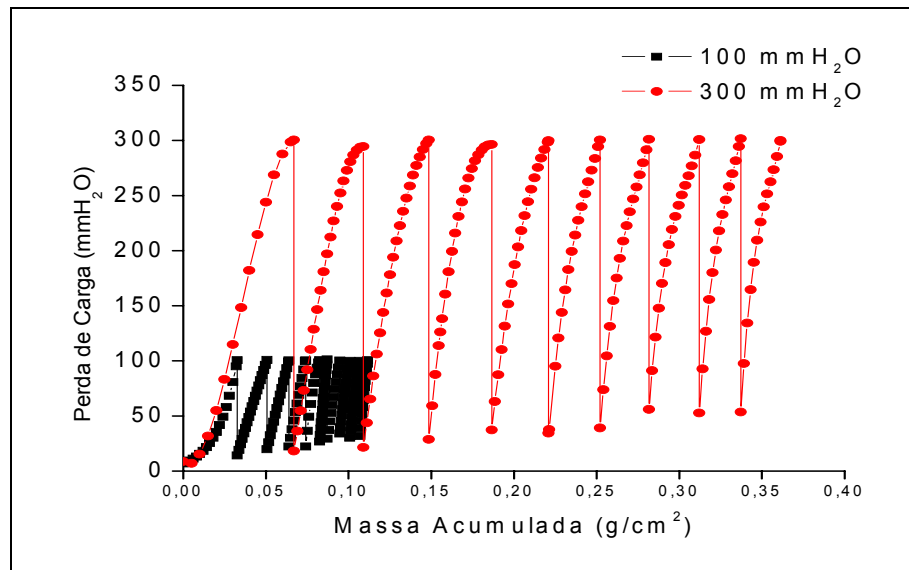


Figura 4.92: Comparação das curvas de filtração entre os experimentos em AC e rocha grossa com 100 e 300 mmH₂O.

Era esperado, uma vez que a perda de carga máxima aumentou, que a massa coletada aumentasse também, como ilustra a Tabela 4.54.

No primeiro ciclo, a massa coletada para a maior perda de carga foi praticamente o dobro da menor perda de carga. No entanto, com o decorrer das filtrações, no décimo ciclo, a massa coletada na maior perda de carga já era cinco vezes maior que na menor. Desta forma, os dados indicam que a filtração com uma perda de carga menor, ao contrário do que se imaginava, resultou em uma maior taxa de degradação da filtração ciclo a ciclo, sendo a diminuição no período de filtração mais significativa para a perda de carga máxima menor. Pode ser que na torta formada na perda de carga máxima de 300 mmH₂O, a maior espessura resultou em maior coesão entre as partículas, em detrimento da força de adesão torta-tecido, facilitando a remoção.

Tabela 4.54: Massa coletada em cada ciclo para os experimentos com Acrílico.

Ciclo	Massa (g/cm ²)	
	Rocha grossa 100 mm H ₂ O	Rocha grossa 300 mm H ₂ O
1	0,0330	0,067
2	0,0180	0,042
3	0,0132	0,039
4	0,0101	0,038
5	0,0085	0,034
6	0,0046	0,031
7	0,0075	0,029
8	0,0061	0,030
9	0,0062	0,025
10	0,0047	0,024

Como resultado desta diferença, obteve-se um comportamento qualitativamente semelhante, mas quantitativamente diferenciado para as massas retida e removida nestes dois casos estudados, como ilustra a Figura 4.93.

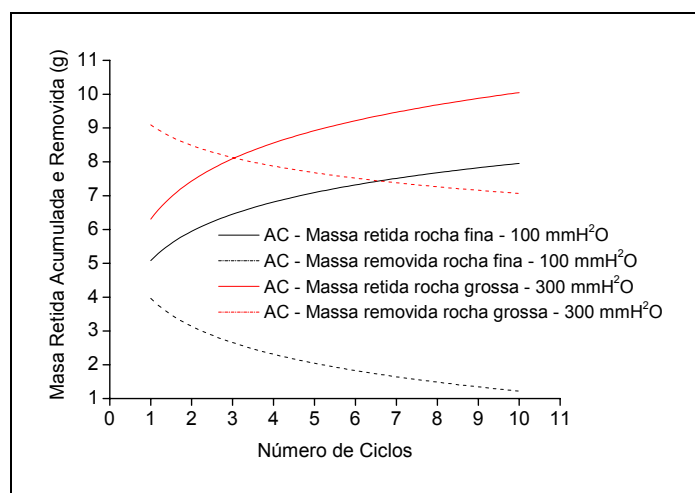


Figura 4.93: Massa de material pulverulento removida pela limpeza e retida após a mesma para a rocha grossa e fina em Acrílico.

Verifica-se, apesar da diferença na perda de carga máxima não ter provocado diferenças no perfil do comportamento dos experimentos, que nos ciclos iniciais a massa removida chegou a ser superior ao valor da massa retida para os ensaios com 300 mmH₂O, o que não havia sido observado em nenhum experimento até então. Isso se deveu ao fato da torta formada ter sido significativamente superior para este último experimento, resultando em uma maior massa removida.

Pela Tabela 4.55 observa-se numericamente o comportamento das massas removida e retida acumulada para o ensaio 10 de cada experimento.

Tabela 4.55: Massa removida e retida acumulada no Ensaio 10 para os experimentos com AC em diferentes perdas de carga máximas.

Ciclo	Massa Removida (g)		Massa Retida Acumulada (g)	
	Rocha grossa 100 mm H ₂ O	Rocha grossa 300 mm H ₂ O	Rocha grossa 100 mm H ₂ O	Rocha grossa 300 mm H ₂ O
1	4,0	10,1	4,5	6,29
2	3,3	8,8	5,5	7,4
3	2,8	8,2	6,3	8,9
4	2,5	8,1	6,5	9,3
5	1,4	7,7	6,8	9,4
6	1,8	7,7	7,1	9,8
7	1,7	6,8	7,3	10,5
8	1,4	7,8	7,4	7,9
9	1,5	6,3	7,6	10,8
10	1,3	6,3	7,8	10,8

Apesar da massa retida acumulada nos experimentos com maior perda de carga máxima ter sido superior, não se pode afirmar que o mesmo ocorreu com o número total de partículas coletadas por camada analisada. Pela Figura 4.94 verifica-se que em alguns ensaios esse número foi superior para os ensaios com maior perda de carga máxima e em outros inferior.

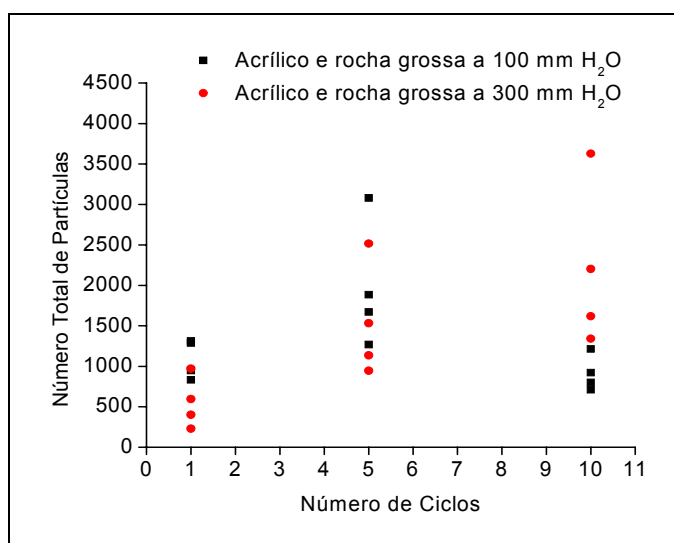


Figura 4.94: Número total de partículas coletadas por camada analisada para o Acrílico e rocha grossa, até 100 e 300 mmH₂O.

No entanto, para esse experimento, aparentemente houve uma tendência do número de partículas coletadas aumentar com o número de ciclos. Este comportamento pode ser devido provavelmente à maior perda de carga durante a filtração.

Como consequência deste acúmulo de partículas, pode-se observar o comportamento da perda de carga residual para ambos os experimentos, através da Figura 4.95, em que se verifica que o aumento da massa retida resultou em aumento da perda de carga residual.

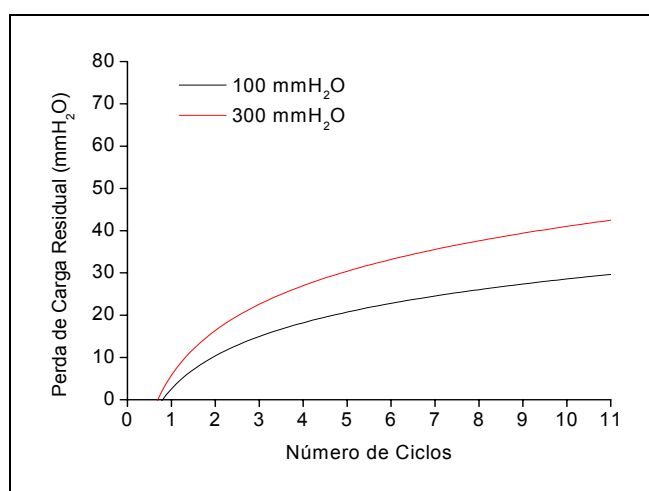


Figura 4.95: Perfil da variação de perda de carga residual média de cada ciclo de filtração para a perda de carga máxima de 100 e 300 mmH₂O.

Em termos numéricos, este comportamento pode ser observado para o ensaio 10 através da Tabela 4.56.

Tabela 4.56: Perda de carga residual no Ensaio 10 para os tecidos analisados.

Ciclo	Perda de Carga Residual (mmH ₂ O)	
	Rocha grossa 100 mm H ₂ O	Rocha grossa 300 mm H ₂ O
1	0	0
2	14,1	7,1
3	19,5	23,3
4	22,8	30,4
5	24,1	33,1
6	28,7	35,2
7	30,9	39,0
8	34,7	48,2
9	31,9	49,3
10	32,5	49,9

A maior perda de carga residual máxima dos ensaios com 300 mmH₂O e as filtrações obviamente mais longas, resultaram em uma torta formada mais compactada, e conseqüentemente com maior resistência ao escoamento, como mostra a Figura 4.96 que ilustra sobre a resistência específica média dos dois experimentos.

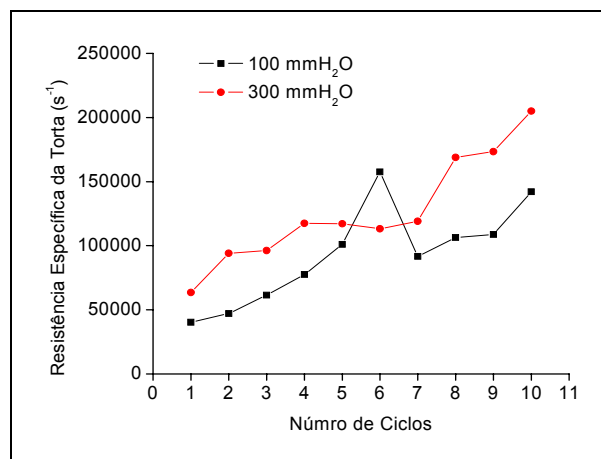


Figura 4.96: Comparação entre a variação das resistência específica da torta para as diferentes perdas de carga máxima.

Este fato pode ser compreendido uma vez que a maior perda de carga pode ter comprimido a torta. A relação entre a perda de carga residual e a massa retida pode ser avaliada através da Figura 4.97. Verifica-se que apesar da diferença nas massas retidas acumuladas, a sua relação com a perda de carga residual é bastante próxima, indicando que, para um mesmo do diâmetro, a mesma massa da rocha fina ou da rocha grossa provoca a mesma perda de carga residual, independente da perda de carga máxima estipulada.

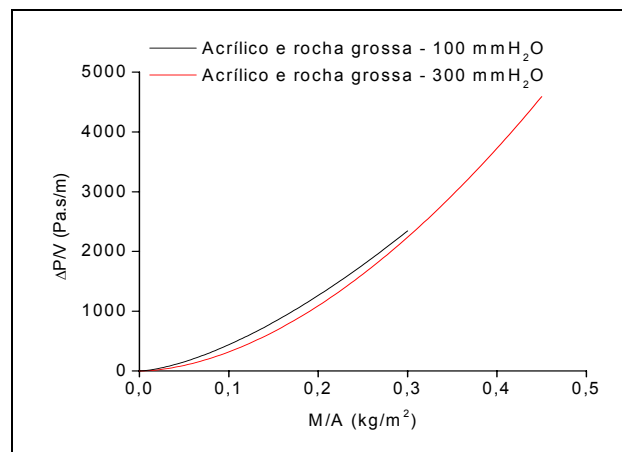


Figura 4.97: Variação da perda de carga residual com a massa retida para os experimentos com diferentes perdas de carga máxima.

A eficiência de remoção para os dois casos está apresentada na Figura 4.98.

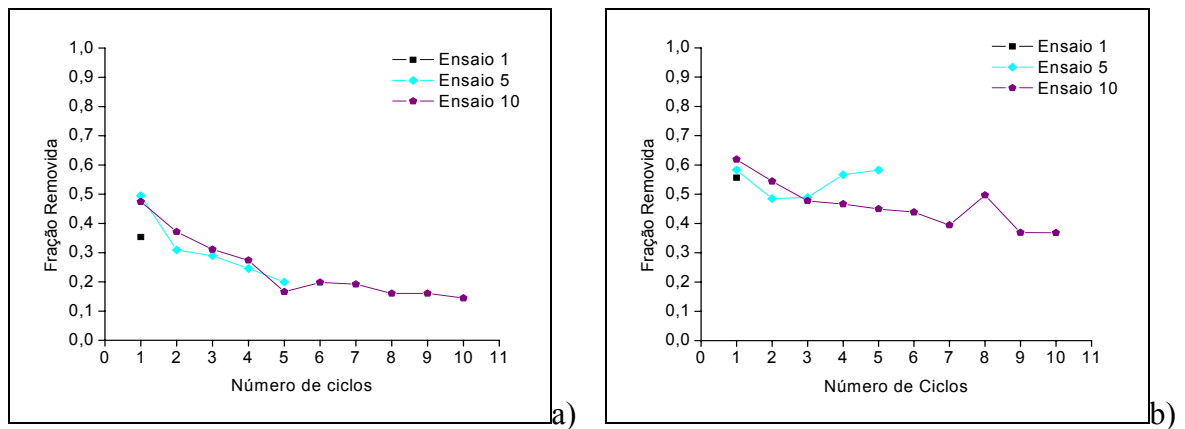


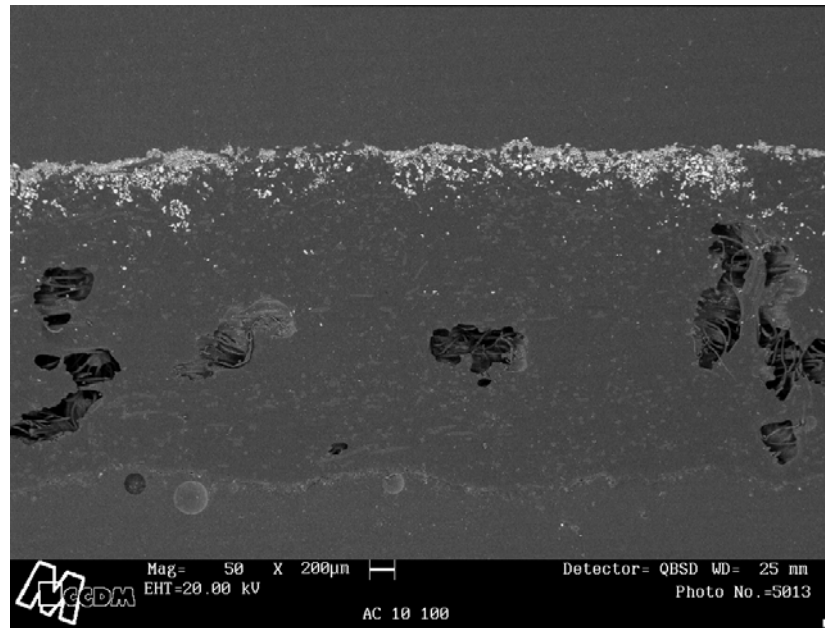
Figura 4.98: Variação da fração de massa removida em cada ciclo de filtração para: a) AC e rocha grossa, 100 mmH₂O, b) AC e rocha grossa, 300 mmH₂O.

A eficiência de remoção de torta foi superior para a rocha grossa até 300 mmH₂O, que apresentou também maior tendência a se tornar constante. Este aumento da eficiência pode ser resultado de sua maior espessura de torta, ou ainda, ter relação com o tamanho dos pedaços removidos, que foram maiores para os ensaios com 300 mmH₂O.

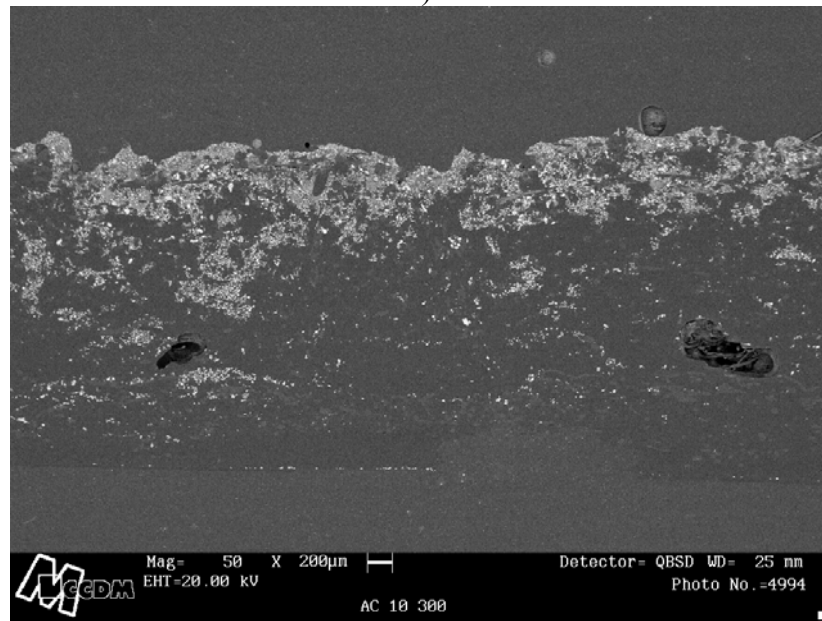
As imagens obtidas em MEV apresentadas pela Figura 4.99 oferecem uma visão geral da amostra do ensaio 10 de cada experimento e também ilustram a diferença na profundidade de penetração de partículas no interior de cada filtro.

A relação dos mecanismos de captura não interfere nesta série de experimentos, pois se utilizou o mesmo meio filtrante e mesmo material pulverulento, sendo variável apenas uma condição operacional, a perda de carga máxima, que não interfere nos cálculos. Deste modo, a maior penetração de partículas apresentada na Figura 4.99 pode ser atribuída apenas à perda de carga máxima admitida.

O comportamento do número de partículas acomodados em cada camada analisada pode ser observado pela Figura 4.100. Verifica-se que o número de partículas é semelhante em todas as camadas, mas partículas encontram-se presentes até camadas mais profundas no experimento com maior perda de carga residual aplicada.



a)



b)

Figura 4.99: Imagem geral da amostra do décimo ciclo do acrílico com a rocha grossa em: a) 100 mm H₂O; b) 300 mm H₂O. Aumento de 50 X.

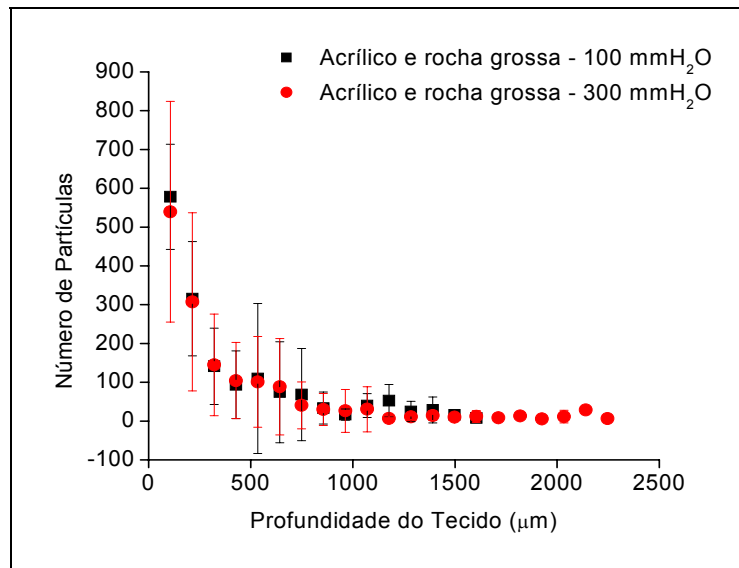


Figura 4.100: Tendência da variação do número de partículas com a profundidade de penetração do Acrílico, para rocha grossa até 100 e 300 mmH₂O.

Esta maior profundidade de penetração de partículas nos experimentos com maior perda de carga máxima exibida nas imagens de MEV pode ser conferida na Figura 4.101.

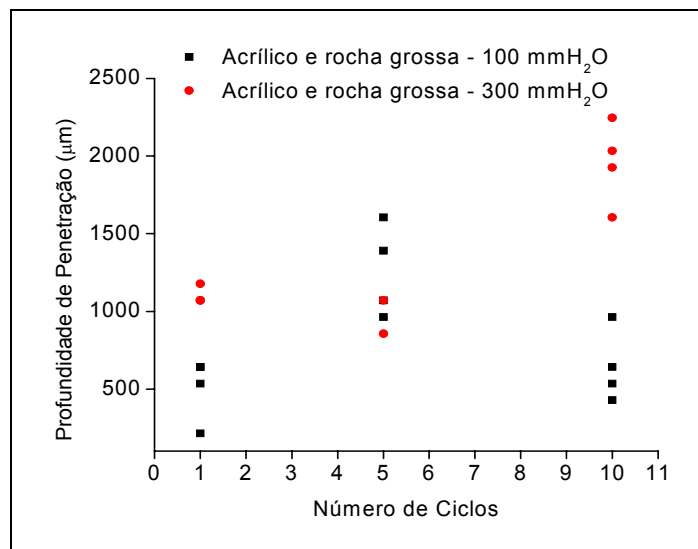


Figura 4.101: Profundidade de penetração dos experimentos com acrílico e rocha grossa com diferentes perdas de carga máximas.

Observa-se que de um modo geral, a profundidade de penetração foi superior para os experimentos com a perda de carga máxima maior, sendo esta diferença mais significativa para o ultimo ensaio. Como se trata de um mesmo material pulverulento,

era de se esperar que não houvesse diferenças no diâmetro de partículas coletadas em cada camada. Porém, a Figura 4.102 ilustra que, apesar do mesmo material, o diâmetro de partículas presentes foi superior para os experimentos com maior perda de carga máxima.

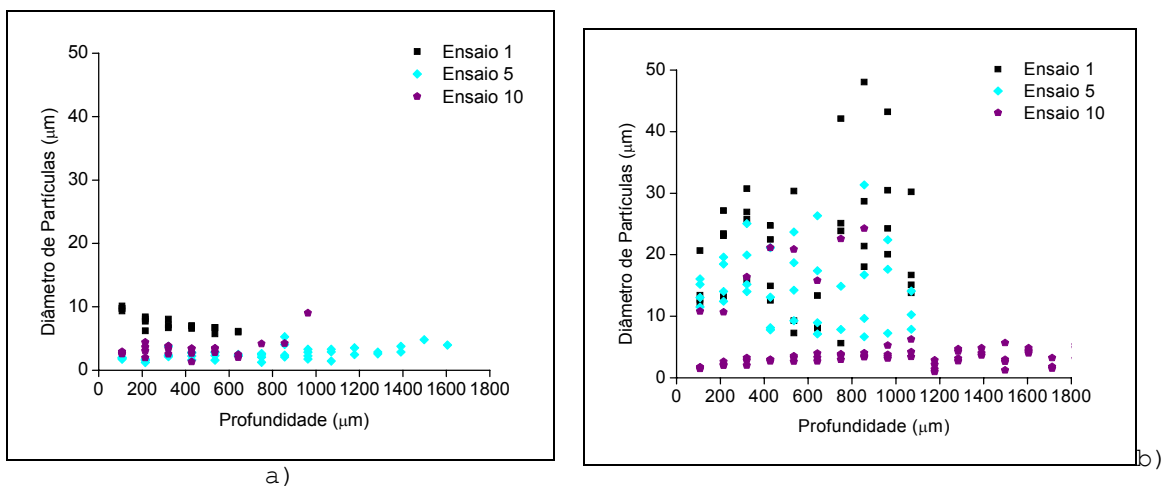


Figura 4.102: Diferença no diâmetro médio de partículas coletadas por camada por ciclo para o Acrílico e rocha grossa.

Este comportamento pode ser atribuído à maior dificuldade em se remover dos interstícios do tecidos as partículas maiores, quando submetidas a uma maior pressão durante a filtração.

4.15 AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE CAPTURA PARA CADA SÉRIE DE EXPERIMENTOS – COMPARAÇÃO COM A LITERATURA.

Nos resultados obtidos por MARTINS (2001), o diâmetro de partículas aumentou com a profundidade do meio. Diferentemente deste trabalho, o referido autor utilizou partículas com diâmetro de 20,97 µm, e perda de carga máxima de cerca de 1000 mmH₂O. Este valor muito superior de perda de carga máxima adotada no trabalho de MARTINS (2001) pode também ter influenciando os resultados, uma vez que esta maior diferença de pressão poderia estar forçando as partículas maiores a penetrarem mais, sem haver força suficiente durante a limpeza capaz de removê-las, já que a velocidade de limpeza aplicada no referido trabalho foi igual a 10 cm/s, portanto, menor

que a utilizada nesta pesquisa. Além disso, pode estar havendo uma influência dos mecanismos de captura citados no item 2.1.2, pela diferença de diâmetros.

Para avaliar a influência dos mecanismos de captura envolvidos no presente trabalho e no trabalho de MARTINS (2001), calculou-se alguns dos parâmetros comentados no Capítulo 2. O diâmetro de fibras utilizado foi o obtido via microscópio, ou seja, foi o diâmetro linear. Os parâmetros foram calculados a partir do diâmetro de Stokes, do diâmetro médio volumétrico e do diâmetro de Stokes calculado pelo diâmetro aerodinâmico, exceto para o trabalho de MARTINS (2000), uma vez que o único dado de diâmetro de partículas disponível era o diâmetro médio volumétrico. O diâmetro médio de fibras adotado do trabalho do referido autor foi igual a 20,0 μm . desta forma calculou-se o número de Stokes (St), o adimensional R e o número de Peclet (Pe), que fornecem dados sobre a influência da impactação, da interceptação e da difusão, respectivamente. Os valores calculados para o poliéster tratado (PT) são iguais para o poliéster não tratado, sendo assim, omitidos da Tabela 4.54. A viscosidade dinâmica foi considerada a 20 C igual a $1,82 \cdot 10^{-4} \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Os demais valores forma os mesmos utilizados no item 4.7.

Tabela 4.57: Adimensionais St, R e Pe obtidos para os dados de diâmetro disponíveis.

Experimento	MARTINS (2000)	AC	AC	PP	PT	PT	
Material	Rocha fosfática	Rocha fina	Rocha grossa	Rocha fina	Rocha fina	Polvilho	
d_f (10^4cm)	20,0	22,7	22,7	23,6	19,43	19,43	
d_p Stokes (10^4cm)	-	3,71	14,67	3,71	3,71	8,64	
Adimensional calculado	St	-	0,51	8,88	0,50	0,6	1,66
	R	-	0,16	0,65	0,16	0,19	0,44
	Pe	-	337.885	1.380.464	351.281	289.211	690.492
d_p méd. vol. (10^4cm)	20,97	4,55	41,47	4,55	4,55	-	
Adimensional calculado	St	19,46	0,78	70,99	0,75	0,91	-
	R	1,05	0,20	1,83	0,19	0,23	-
	Pe	1.663.158	417.707	3.930.959	434.268	357.535	-
d_p St calc (10^4cm)	-	2,74	16,30	2,74	2,7	7,96	
Adimensional calculado	St	-	0,32	10,97	0,25	0,33	1,47
	R	-	0,18	0,72	0,12	0,14	0,41
	Pe	-	245.796	1.535.577	255.541	210.388	635.119

Desta forma, de acordo com a teoria da captura por uma fibra simples apresentada no Capítulo 2, para números de Stokes menores que 0,1 a impactação passa a ser desprezível na captura de partículas, e para R menores que 0,1 a interceptação também torna-se insignificante. Pelos valores apresentados para estes adimensionais, verifica-se que em nenhum caso aqui estudado estes mecanismos podem ser desprezados.

No entanto, nos casos da rocha fosfática utilizada nos ensaios de MARTINS (2000) e da rocha grossa, observa-se valores significativamente maiores do número de Stokes, indicando a predominância do mecanismo de impactação inercial e os maiores valores de Pe , indicando que nestes casos, a captura pelo mecanismo difusional é menos relevante. Particularmente para a rocha fosfática grossa, o mecanismo de captura pela interceptação direta também foi expressivo, dados os elevados valores de R apresentados.

Nos experimentos com a rocha fina, os valores de St e R são bem inferiores, o que pode significar que haja atuação também do mecanismo de coleta difusional, indicada pelos menores valores de Pe . A partir da observação do interior do meio filtrante das Figuras 4.10, 17, 24 e 31, em cada situação verifica-se, por exemplo, que nas filtrações com a rocha fina as partículas tenderam a permanecer próximas das fibras, o que não ocorreu para os demais materiais pulverulentos estudados. Esta constatação evidencia o que pode ser a formação dos dendritos para as partículas mais finas aqui estudadas. O polvilho apresentou partículas dispersas no seio do tecido, não apenas aderidas às fibras, o que pode indicar uma formação menos evidente dos dendritos, assim como a rocha fosfática grossa.

Em se tratando da profundidade de penetração, no trabalho de MARTINS (2001) esteve entre 600 e 830 μm , para um feltro de poliéster tratado em ensaios utilizando velocidade de filtração igual a 10 cm/s, de limpeza igual a 10 cm/s, perda de carga máxima admitida de 110 cmH₂O e diâmetro médio volumétrico de partículas igual a 20,97 μm . A penetração máxima neste trabalho, para o polipropileno foi menos profunda (entre 500 e 600 μm) e no acrílico foi semelhante ao tecido do referido autor, chegando até a aproximadamente 900 μm , mesmo sob condições mais moderadas de perda de pressão máxima. Para o experimento com rocha grossa e perda de carga máxima de 300 mm H₂O, verificou se uma maior profundidade de penetração, que

chegou próxima a 2.500 μm , ou seja, bem superior aos experimentos de MARTINS (2001). No entanto, as características do material filtrante do autor não são conhecidas, impossibilitando uma discussão mais aprofundada a respeito de tais comportamentos.

O que se observou, para os experimentos com material mais grosso, foi que, aparentemente, observou-se partículas maiores retidas no interior do meio filtrante, o que provavelmente é resultado da dificuldade de se remover estas partículas maiores do interior do tecido.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na realização deste trabalho permitem apresentar as seguintes conclusões, seguindo-se a seqüência apresentada no capítulo de resultados, a partir dos ensaios preliminares:

- i. Os ensaios com tecidos trançados mostraram que os tecidos que apresentavam pespontados nos fios possuíam a curva característica com concavidade oposta aos tecidos trançados com fios lisos e sem fibras;
- ii. Nos tecidos não trançados, o tratamento superficial ajuda a minimizar o período de filtração interna;
- iii. O tratamento superficial provoca um aumento da perda de carga;
- iv. O ponto de colmatação é maior para o tecido sem tratamento, e , portanto, o período de filtração interna também é;
- v. A ausência de tratamento resultou em filtrações inicialmente mais longas que foram diminuindo com o passar dos ciclos até valores inferiores aos demais tecidos tratados;
- vi. A filtração interna dependeu da permeabilidade e porosidade dos tecidos, sendo mais longa para os tecidos com maiores valores de permeabilidade e porosidade;
- vii. A resistência específica da torta variou para cada tecido variou para cada tecido, indicando sua dependência deste, sendo maior para tecidos com maiores valores permeabilidade e porosidade, aparentando reproduzir as características do tecido suporte;
- viii. O tecido com maior abertura superficial apresentou também maior massa retida;
- ix. O número total de partículas coletadas por seção analisada foi maior para o tecido não tratado e maior para o tecido tratado com maior permeabilidade e porosidade, da mesma forma como a filtração interna;
- x. Nos experimentos com a rocha fina e diferentes tecidos tratados, o comportamento da massa retida de aumentar nos ciclos iniciais e se tornar

- constante após alguns ciclos não se refletiu no número total de partículas coletadas por seção, que foi praticamente constante com o número de ciclos;
- xi. A saturação do tecido pode ser, na verdade, um processo que ocorre mais na superfície do tecido (provavelmente na torta), que em seu interior, como indica o comportamento do número de partículas retidas por ciclo, sugerindo que a penetração seja um fenômeno que se defina já no primeiro ciclo pra os tecidos tratados;
 - xii. Para os tecidos menos permeáveis o incremento da perda de carga residual provocado por uma determinada massa de rocha fina foi maior que para os tecidos mais permeáveis;
 - xiii. No caso do Polipropileno houve uma menor massa retida, mas uma maior perda de carga residual, quando comparado com o Acrílico, apesar da maior eficiência de remoção de primeiro, indicando que para tecidos diferentes a perda de carga residual deixa de ser um parâmetro adequado para determinar a eficiência de limpeza;
 - xiv. O número médio de partículas coletadas em cada camada do tecido tratado foi praticamente o mesmo indiferente do tecido, sendo maior pra o tecido sem tratamento;
 - xv. O que mudou para os tecidos tratados foi a profundidade de penetração, que foi maior para o tecido não tratado, seguida do Acrílico, Poliéster tratado e Polipropileno, tendência que sugere que maiores permeabilidades e porosidades resultem em maiores profundidades de penetração, mas não na intensidade de penetração;
 - xvi. Todos os tecidos filtrando rocha fina apresentaram um decaimento exponencial do número de partículas na interface torta-filtro para o seio do tecido;
 - xvii. A intensidade do tratamento interferiu na profundidade de penetração, sendo que tecidos com mais fibras fundidas na superfície apresentaram menor profundidade de penetração, mesmo possuindo permeabilidade e porosidade semelhantes, como no caso do Acrílico e Poliéster tratado;
 - xviii. No caso das filtrações com polvilho, a maior eficiência de remoção não se refletiu em menor profundidade de penetração, indicando que a limpeza tem

- uma ação mais superficial que interna, ou seja, remove mais as partículas da torta que as partículas acomodadas no interior do meio filtrante;
- xix. As curvas de filtração subseqüentes à primeira limpeza tiveram um comportamento praticamente linear tanto para o pT quanto para o PNT, indicando que a forma da curva não depende apenas do tecido, mas do material recolhido;
- xx. A resistência específica das tortas de polvilho apresentaram valores constantes após a primeira limpeza, indicando uma maior homogeneidade da torta constituída por partículas mais esféricas e quase monodispersas;
- xxi. A linearidade apresentada nas curvas de filtração do polvilho para o PT e PNT indicam que o fato das curvas serem mais ou menos lineares não depende apenas da eficiência de limpeza, mas também das características do material pulverulento;
- xxii. A filtração com partículas de polvilho apresentou período de filtração interna mais longo, com maior ponto de colmatação para ambos os tecidos (PT e PNT), o que pode ser resultado do maior diâmetro, da forma mais esférica e da distribuição mais estreita do polvilho;
- xxiii. A filtração com polvilho apresentou ciclos mais longos, com maior massa coletada (a despeito de sua menor densidade) indicando que o maior diâmetro, esfericidade e distribuição estreita constituem uma torta com melhor acomodação de partículas, como ilustra os menores valores de resistência específica da torta de polvilho, quando comparados com as tortas de rocha fina;
- xxiv. Nas filtrações com partículas maiores de rocha fosfática não houve tendência do diâmetro aumentar ou diminuir com o número de ciclos nem com a profundidade de penetração;
- xxv. A profundidade de penetração não tendeu a aumentar ou diminuir com o número de ciclos para a rocha grossa;
- xxvi. A profundidade de penetração foi, de modo geral, semelhante para a rocha fina e para a rocha grossa, mas em algumas amostras foi muito superior para a rocha grossa;

- xxvii. A rocha grossa apresentou ligeira tendência do número total de partículas aumentar com o número de ciclos;
- xxviii. Os experimentos com maior perda de carga máxima apresentaram maior profundidade de penetração, provavelmente pela maior duração da filtração interna;
- xxix. O número de partículas coletadas em cada camada analisada foi muito semelhante para as duas perdas de carga máxima utilizadas, sendo que houve mais variação para os experimentos com menor perda de carga máxima;
- xxx. O diâmetro de partículas retidas foi maior para os ensaios com maior perda de carga máxima.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de prosseguimento dos estudos desenvolvidos neste trabalho, cita-se as seguintes possibilidades:

- Avaliação da formação de dendritos, mais especificamente sua porosidade, com a velocidade de filtração e com o diâmetro das partículas;
- Avaliação das propriedades da torta formada durante a filtração, antes da realização da limpeza, principalmente sua porosidade;
- Determinação da eficiência de filtração dos experimentos desenvolvidos neste trabalho, e sua associação com os mecanismos de captura aqui determinados;
- Verificação da influência das propriedades químicas do material pulverulento e do meio filtrante na filtração;
- Verificar a influência da velocidade de limpeza na profundidade e intensidade de penetração de partículas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. L. *Filtração de ar em filtros de tecido*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 1991.

AGUIAR, M.L. *Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 1995.

AGUIAR, M. L., J. R. COURY. Cake formation in fabric filtration of gases. Industrial and Engineering Chemistry Research. V. 35, n. 10, p. 3673-3679, 1996.

ARIMAN, T. e HELFRITCH, D.J. Filtration and Separation, v.14, p.127-130, 1977.

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

BILLINGS, C.E., WILDER, J. Handbook of fabric filter technology – Fabric systems study, vol.01, Springfield, Massachussets,1970.

BROWN, R.C. Nature, Stability and effectiveness of electric charge in filters. In:Advances in Aerosol Filtration., Lewis Pablishers, 1998.

BROWN, R.C. & WAKE, D. Loading filters with monodisperse aerosols: macroscopic treatment. Journal of Aerosol Science, v. 30, n.02, p.227-234, 1999.

BUONICORE, A.G. & DAVIS, W.T. Air pollution engineering manual. New York, Van NOstrand Reinold, 1992,1992 918p.

CALLÉ, S., BÉMER, D., THOMAS, D., CONTAL, P., LECLERC, D. Changes in the performance 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. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. Powder Technology, v. 128, p. 213-217, 2002a.
- CALLÉ, S., CONTAL, P. THOMAS, D., BÉMER, D. LECLERC, D. Descriptions of the clogging and cleaning cycles of filter media. Powder Technology, v.123, p.40-52, 2002b.
- CHEN, C.C.; CHEN, W.Y.; HUANG, S.H.; LIN, W.Y.; KUO, Y.M.; JENG, F.T. Experimental study on the characteristics of needlefelt filters with micrometer-sized monodisperse aerosols. Aerosol Science and Technology. V. 34, n.3, mar, p.262-273, 2001.
- CHENG, Y.-H E TSAI, C. -Journal of Aerosol Science and Technology, v.29, n.4, p.315-328, 1998.
- CHEREMESINOFF, P.N. & YOUNG, R.A. Air pollution control and design handbook, part I. New York, Marcel Dekker Inc. 1977, p.607.
- CLARK, G. Design considerations of needlefelts used for air filtration applications. The Journal of the Filtration Society, v.01, 2001.
- DAVIS, W. T.; KIM, G. D. Effect of prefilters on the performance of HEPA filters. Filtration & Separation, p. 51-56, april, 1999.
- DENNIS, R.; KLEMM, H.A. Modeling concept for pulse-jet filtration. Journal of Air Pollution Control Association. V.30, n.01, p.38-43, 1980.
- DENNIS, R.; KLEMM, H.A. Recent concepts describing fabric filter system behaviour, Filtration and Separation, Jan/Feb, 1982.

- 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.
- DONOVAN, R.P. Fabric filtration for combustion sources. New York, Marcel Dekker Inc., 1985.
- DULLLIEN, F.A.L. Introduction to industrial gas cleaning. Academic Press, San Diego, 1989, 284p.
- DURHAM, J.F., HARRINGTON, R.E. Filtration and Separation, Jul/Aug, p.389-398, 1971.
- ELLENBECKER, M.J.; LEITH, D. Dust removal from non-woven fabrics-cleaning methods need to be improved. Filtration and Separation, jul/aug, p.316-320, 1981.
- ENDO, Y.; ALONSO, M. Physical meaning of specific cake resistance and effects of cake properties in compressible cake filtration. Filtration and Separation, sep, p.43-46, 2001.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, v.48, n.2, p.89-94, 1952.
- FUCHS, N.A. The Mechanics of Aerosol. Pergamon Press, 1964.
- GRAEF, A., STENHOUSE, J.T.I., WALSH D.C. The effect of solid aerosol on prefilter material performance. Journal of Aerosol Science, v. 26, suppl 01, p.S741-S742, 1995.
- GOLESWORTHY, T. A review of industrial flue gas cleaning (2). Filtration and Separation, v. 36, n.04, 1999.

- GRZYBOWSKI, P. GRÁDON, L. The process of nonsteady-state filtration in non woven filtering materials. Journal of Aerosol Science, suppl. 01, v.27, p. S615-S616, 1996.
- GUPTA, A., NOVICK, V.J., BISWAS, P., MONSON, P.R. Aerosol Science and Technology, v.19, n.1, p.94-107, 1993.
- HARDMAN, E. Filter media selection, science or black art? The Journal of the Filtration Society, v.01, 2001.
- HENRY, F.S., ARIMAN,T. Numerical modeling of electrically enhanced fibrous filtration. Fluid Filtration: Gas, volume 01, p.13-26. ASTM STP 975, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986.
- HINDS, W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. Wiley Interscience, New York, 1999, p.483.
- HINDY, K.T.; SIEVERT, J.; LÖFFLER, F. Influence of cloth structure on operational characteristics of pulse-jet cleaned filter bags. Environment International, v.13, n.2, p.175-181, 1987.
- INNOCENTINI, M. D. M.; PARDO, A. R. F.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V.C. How accurate is Darcy's law. The American Ceramic Society Bulletin, p.64-68 nov, 1999.
- ITO, L.X. Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases. Dissertação (mestrado). 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.02, pp.385-393, 1994.

- JAPUNTICH, D.A.; STENHOUSE, J.I.T.; LIU, Y.H. Effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous filter. Journal of Aerosol Science, v.28, n.01, p.147-158, 1997.
- KANAOKA, C., HIRAGI, S. Pressure drop of air filter with dust load. Journal of Aerosol Science, v. 21, n.1, p.127-137, 1990.
- KANAOKA, C.; AMORNKITBSMRUNG, M. Effect of permeability on release of captured dust from a rigid ceramic filters. Powder Technology, n.118, p.113-120, 2001.
- KAVOURAS, A., KRAMMER, G. Distributions of age, thickness and gas velocity in the cake of jet pulsed filters – application and validation of a generations filter model. Chemical Engineering Science, v. 58, p.223-238, 2003.
- KOCH, D.; SCHULTZ, K.; SEVILLE, J.P.K.; CLIFT, R. Regeneration of rigid ceramic filters. Gas Cleaning at High Temperatures. Blackie Academic & Professional, London, p. 244, 1993.
- KOCH, D.; SEVILLE, J.; CLIFT, R. Dust cake detachment from gas filters. Powder Technology, n. 86, p.21-29, 1996.
- LEE, K.W. Particle collection mechanisms pertinent to granular bed filtration. Fluid Filtration: Gas, volume 01, p.46-59. ASTM STP 975, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1986.
- LEITH, D. & ALLEN, R.W.K. Dust filtration by fabric filters. In: Progress in filtration, R.J. Wakman (ed.), Elsevier, NL, v.4, p. 1-57, 1986.
- LISOWSKI, A., JANKOSWSKA, E., THORPE, A., BROWN, R.C. Performance of textile fibre filter material measured with monodisperse and standard aerosols. Powder Technology, v.118, p.149-159, 2001.

- LORA, E.E.S. Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte. Editora Interciência, 2ª ed. Rio de Janeiro, 2002.
- MARTINS, J.C. *Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2001a.
- MARTINS, J.C. LEITE, N.R., AGUIAR, M.L. Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido. ANAIS – XXVI ENEMP 2001b.
- MATTESON, M.J., ORR, C. Filtration: principles and practices. 2ª ed, editora Dekker, New York, 1987.
- MAUSCHITZ.G.; KOSCHUTNIG,W.; HÖFLINGER,W. The influence of filter regeneration on the internal particle rearrangement of nonwovens for cleanable dust filters. 16 th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2004.
- MAUSCHITZ.G.; KOSCHUTNIG,W.; HÖFLINGER,W. Analysis of the clogging behaviour of thermally finished nonwoven dust filter media by optically detected porosity parameters. Anais, V. II, p.II-20-II-28, FILTECH, 2005.
- MAYER, E., WARREN, J. Evaluating filtration media: a comparison of polymeric membranes and nonwovens. Filtration and Separation, dec, p.912-914, 1998.
- MIGUEL, A.F. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles. Aerosol Science, v.34, p.783-799, 2003.

- MOREIRA, F.L. Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros de manga. Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1998.
- MOREIRA, F.L., SILVA NETO, O.G., AGUIAR, M.L., COURY, J.R. Filtração de gases em filtros de manga: relação da queda de pressão residual com a porcentagem de torta removida. XXVII ENEMP, anais, p.151-158, 1999.
- MORRIS, K.; ALLEN, R.W.K. The influence of dust and gas properties on cake adhesion in fabric filters. Filtration and Separation, v.33, n.04, p.339-343, 1996.
- NEGRINI V.S., AGUIAR, M.L., COURY, J.R. Determinação da porosidade de tortas de filtração de gases. XXVI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, v.1, p. 193, 1998.
- PAYATAKES, A.C. Model of transient aerosol particles deposition in fibrous media with dendritic pattern. AIChE Journal, v.23, n.2, 1977
- POWELL, J. Surface filtration: the way forward? Filtration and Separation, mar , p.134-136, 1998.
- REMBOR, H.-J., KASPER, G. Fibrous filter – measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency. III World Congress on Particle Technology , 1996.
- RODRIGUES. A.C.M. Estudo da formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos de polipropileno e de algodão. Dissertação. Universidade Federal de São Carlos, 2004.
- ROSS, R.D. Air pollution and industry. Van Nostrand Reinhold Company, New York, p.489, 1972

ROTHWELL, E. Fabric dust filtration: principles and practice. Filtration & Separation, p. 471-475, September/October, 1980.

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

SALVINI, V.R.; INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema Al₂O₃-SiC. Cerâmica, v.46, n. 298, mai/jun, 2000.

SANCHEZ, J.R., RODRIGUEZ, J.M., ALVARO, A., ESTEVEZ, A.M. Comparative study of different fabrics in use in the filtration of an aerosol using more complete filtration indexes. Filtration and Separation, p.593-598, 1997.

SCHIMIDT, E. Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media. Filtration and Separation, v.32, n.08, sep. p.789-793, 1995.

SEVILLE, J.P.K., CHEUNG, W., CLIFT, R. A patchy-cleaning interpretation of dust cake release from non-woven fabrics. Filtration and Separation, v.26, n. 03, p.187-190, 1989.

SILVA, G.B., AGUIAR, M.L. Influência das variáveis operacionais no processo de filtração em um filtro de tecido. Anais III COBEQ-IC, artigo 32, 1999a.

SILVA, G.B., LUCAS, R.D., AGUIAR, M.L., COURY, J.R. Estudo do efeito das variáveis operacionais na formação de tortas de filtração de gases em filtros de tecido. XXVII ENEMP, p.135-142, 1999b.

SILVA NETO, O.G., AGUIAR, M.L., COURY, J.R. Filtração de gás em filtro de manga: estudo da porosidade. XXVII ENEMP, anais, p;135-142, 1999.

- SILVA, G.B., LUCAS, R.D., OLIVEIRA, W.P., AGUIAR, M.L., COURY, J.R. Effect of parameters on cake formation and removal during gás-solid filtration in fabric filters. VIII World Filtration Congress, anais, p.245-248, 2000.
- STÖCKLMAYER, CH., HÖFLINGER W. Simulation of the long-term behaviour of regenerable dust filters. Filtration and Separation, v. 35, n. 04, p.373-377, 1998a
- STÖCKLMAYER, CH., HÖFLINGER W. Simulation of the regeneration of dust filters. Mathematics and Computer in Simulations. V.46, p.601-609, 1998b.
- STRAUSS, W. Industrial gas cleaning. 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, p.621. 1975.
- TIENI, E.F., RODRIGUES, K.B., AGUIAR, M.L. Influence of cleaning velocity in the patchy cleaning behaviour. FILTECH, anais em CD-room, 2005.
- THEODORE, L. & BUONICORE, A.J. Air pollution control equipment – particulates, v. 01, CRC Press, Flórida, 1988.
- 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.
- TSAI, C.J., CHENG, Y.H. Factors influencing pressure drop through a dust cake during filtration. Aerosol Science and Technology, v.29, p.315-328, 1998
- VDI 3926 Part 1. “Testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media”. Düsseldorf, Germany, (2003).
- 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, 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.
- 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.
- WANG, C-S. Eletrostatic forces in fibrous filters – a review. Powder Technology, v. 118, p.166-170, 2001.
- WEIGERT, T. RIPPERGER, S., Effect of filter fabric blinding on cake filtration. Filtration and Separation, Jun, p.507-510, 1997.
- WILDER, J.E., BILLINGS, C.E. Performance of fabric filtrations systems. Second International Clean Air Congress, 1970a.
- WILDER, J.E., BILLINGS, C.E. Performance of fabric filtration sustems. Second International Clean Air Congress, 1970b.
- WIMMER, A. PTFE yarns and fibres in hot gas filtration. Filtration and Separation, Mar, p.26-28, 1999.
- YLITUOMI, T., STENHOUSE, J.I.T., WALSH, D.C. The effects of filter packing density on aerosol particle bounce. Journal of Aerosol Science, v.26, Suppl.1, p.S917-S918, 1995.

ANEXO A

PREPARAÇÃO DE AMOSTRA PARA MEV E ANÁLISE NO IMAGE-PRO PLUS

O desenvolvimento desta etapa do trabalho foi similar ao de ITO (2002), e consiste nos seguintes passos:

PRÉ-ENDURECIMENTO DA MOSTRA

O equipamento utilizado está apresentado na Figura A.1, construído com duas seções cilíndricas de ferro, semelhantes à caixa de filtração. Em seu interior foi alocado um suporte de arame para sustentar o meio filtrante. A parte interna dessas tampas foi revestida com uma borracha macia, a fim de permitir a vedação do sistema. Para realizar tal procedimento utilizou-se o equipamento mostrado na Figura A.A, que consistia de duas tampas de ferro galvanizado, semelhante à caixa de filtração.

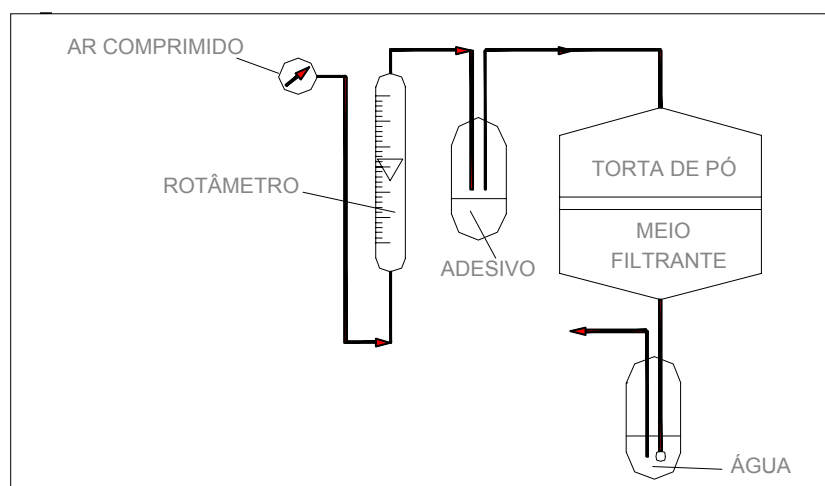


Figura 0.A: Equipamento para pré-endurecimento do meio filtrante.

O tecido após ser limpo foi retirado da caixa de filtração e transportado à caixa de “pré -endurecimento”, onde foi fixado.

Para medir a vazão de ar comprimido que arrastava o vapor do adesivo instantâneo (“LOCTITE-416”) usou-se um rotâmetro, o valor desta vazão foi mantido constante em 0.5 l/min.

O método consistia em passar vapor de um adesivo instantâneo (“LOCTITE-416”), arrastado pelo fluxo de ar úmido, através do meio filtrante. A velocidade do gás de arraste foi mantida em aproximadamente 0,1 cm/s, para evitar um possível rearranjo das partículas impregnadas no tecido durante o “pré-endurecimento”. O tecido ficou neste equipamento por aproximadamente 72 horas até que fosse garantida a impregnação do adesivo ao meio filtrante, pingando-se duas gotas de adesivo a cada duas horas.

EMBUTIMENTO DO TECIDO

Após o “pré-endurecimento” o tecido foi transportado para uma vasilha de pirex redonda, contendo uma esponja de 0,5 mm de espessura de mesma área do tecido. A parte interna desta vasilha ficou completamente encharcada com uma resina embutidora, a PMS-10. Depois de se colocar o tecido no recipiente, adicionou-se mais resina até que todo o tecido estivesse completamente encharcado. Em seguida colocou-se o tecido numa estufa a 60°C, por aproximadamente 72 horas, para “curar” a resina. Este procedimento está esquematizado na Figura A.B.

A resina utilizada (PMS-10) possui baixa viscosidade, 7 a 10 cp, é anaeróbica, de cor clara, tempo de vida de 1 ano e não contém solvente. Esta resina foi fornecida pela LOCTITE do Brasil.

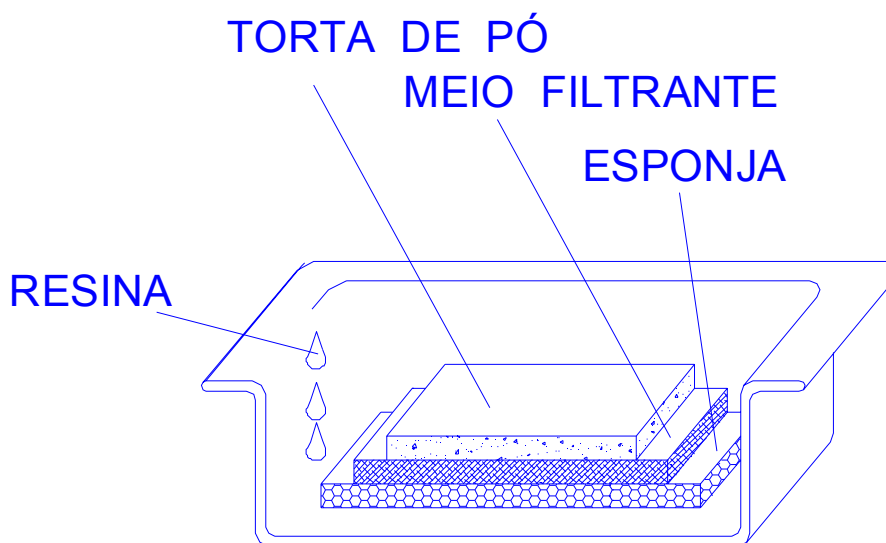


Figura 0.B: Vista do equipamento de embutimento.

SECCIONAMENTO

O tecido já endurecido foi seccionado em pedaços quadrados de 1 cm^2 de área, aproximadamente, utilizando uma serra de correia. A seguir estes pedaços foram embutidos em moldes cilíndricos de PVC, utilizando outra resina, RESAPOL-208, deixando-a “curar” por 24 horas à temperatura ambiente. A impregnação com esta resina proporcionou resistência mecânica à amostra, visando atenuar a desestruturação nas etapas de esmerilamento e polimento.

ESMERILAMENTO

Esta etapa visou retirar os arranhões causados pelo seccionamento do tecido e desgastar a amostra.

As amostras foram lixadas, a úmido, cuidadosamente, em lixas de carbetto de silício na seqüência de 320, 600, 1200 e 2000 mesh, mantendo-se a operação em torno de 10 minutos em cada lixa, dependendo da amostra. Entre cada lixa a amostra foi lavada com água e álcool.

POLIMENTO

Depois de esmeriladas as amostras foram polidas, utilizando-se uma politriz em baixa rotação. O tecido utilizado na politriz é um veludo macio, que foi impregnado com uma suspensão de alumina de 1 μ m. O tempo de duração desta operação variou de acordo com a amostra, mas girou em torno de 30 minutos.

O polimento foi feito até que se retirasse todos os riscos deixados na amostra pelas lixas da etapa anterior, que podiam ser vistos em microscópio óptico.

Quando estava livre de qualquer ranhura, a amostra foi submetida a um recobrimento metálico com ouro puro, utilizando um equipamento específico denominado “Sputtering”, do Laboratório de Preparação de Amostras do CCDM (UFSCar).

ANEXO B

DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS TECIDOS LIMPOS

A determinação da permeabilidade dos tecidos foi realizada utilizando-se dois manômetros inclinados, pela sua melhor precisão.

Cada tecido foi colocado no módulo de filtração estando completamente limpo e foi submetido a velocidades crescentes, no sentido da filtração. Os valores de perda de carga na saída e na entrada do elemento filtrante foi registrado. Estes valores, após a conversão do ângulo de inclinação dos manômetros, foram transformados para Pascal, a unidade conveniente de pressão. A permeabilidade foi então calculada utilizando-se a equação 2.7.

As curvas da variação da pressão com a velocidade estão apresentadas na Figura B.1.

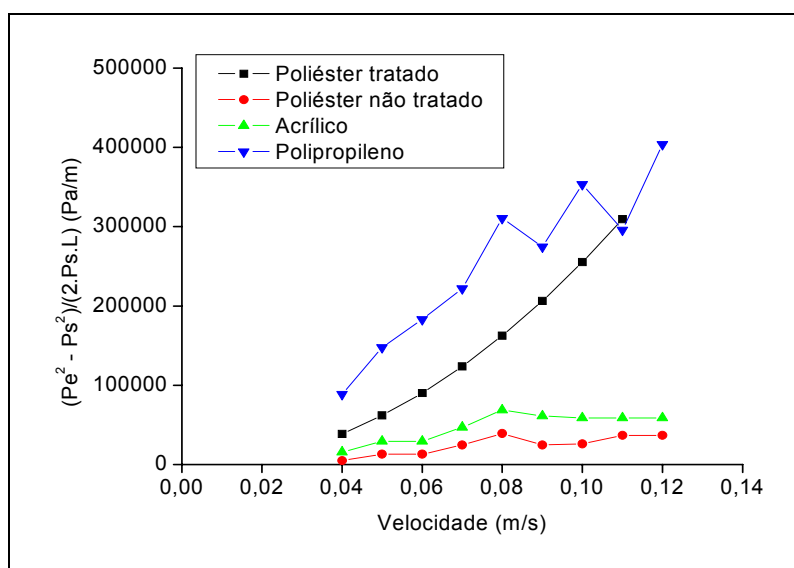


Figura B.1: Curvas de permeabilidade dos tecidos empregados.