

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

**Avaliação do desempenho dos meios filtrantes
de celulose RAD + e RAD Plus submetidos à
filtração de gases a altas pressões**

Bruno de Araújo Lima
Orientador: Dra. Mônica Lopes Aguiar
Coorientador: Dra. Gabriela Cantarelli Lopes
Coorientador: Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe

São Carlos

2015

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

Avaliação do desempenho dos meios filtrantes de celulose RAD + e RAD Plus submetidos à filtração de gases a altas pressões

Bruno de Araújo Lima

Dissertação apresentada ao curso de Pós Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração de Controle Ambiental.

Orientador: Dra. Mônica Lopes Aguiar
Coorientador: Dra. Gabriela Cantarelli Lopes
Coorientador: Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe

São Carlos

2015

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

L732ad Lima, Bruno de Araújo.
Avaliação do desempenho dos meios filtrantes de
celulose RAD + e RAD Plus submetidos à filtração de gases
a altas pressões / Bruno de Araújo Lima. -- São Carlos :
UFSCar, 2015.
87 f.


Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2015.

1. Filtração de gases. 2. Meios filtrantes de celulose. 3.
Permeabilidade. 4. Porosidade. I. Título.


CDD: 660.284245 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE BRUNO DE ARAÚJO LIMA APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 23 DE JANEIRO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA:


Mônica Lopes Aguiar
(Orientadora), UFSCar


Gabriela Cantarelli Lopes
(Coorientadora), UFSCar


Vádila Giovana Guerra Béttega
UFSCar


Eduardo Hiromitsu Tanabe
UFSM


Maria Angélica Martins Costa
UNESP

*Dedico este trabalho aos
meus pais, Jair e Maria
Cristina por tornarem esse
sonho possível.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois sem ele seria impossível encontrar forças para continuar.

Aos meus pais Jair e Maria Cristina por acreditarem em minha capacidade e nunca medirem esforços por mim.

A minha família, pelo apoio e força.

A Dra. Maria Angélica Martins Costa, uma das principais responsáveis pelas minhas conquistas.

A minha namorada Maiara, que está sempre do meu lado em todos os momentos.

Aos meus orientadores Dra. Mônica Lopes Aguiar, Dra. Gabriela Cantarelli Lopes e Dr. Eduardo Hiromitsu Tanabe, por toda atenção, ajuda, amizade e principalmente pela oportunidade concedida.

Aos amigos do grupo de pesquisa, Samirys, Ana Claudia, Eduardo, Flávia, Tati, Daniel e ao técnico do laboratório Marcos.

Aos amigos de São Carlos: Melécio, Waldir, Diego, Rodrigo, João, Gabriel, Cadu, Luciano, Renata, Robson, entre outros, que estão presentes no meu dia a dia tanto dentro como fora do trabalho.

A todos os amigos do DEQ/UFSCar.

Aos amigos de infância que sempre me deram apoio.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

A todos que de alguma forma contribuíram com este trabalho.

Sucesso é a caminhada e não a
linha de chegada. (*Kamau*)

RESUMO

O processo de filtração de gases possui diversas vantagens, tanto para prevenção de danos ao meio ambiente e saúde dos seres vivos quanto para prevenção de danos a equipamentos em diversos processos industriais. Os meios filtrantes usados nesses processos podem ser de vários materiais, entre eles os metálicos, de fibra de vidro, de polipropileno, de poliéster e de celulose, com este último sendo destacado pelo seu baixo custo. O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho dos filtros de celulose RAD + e RAD Plus, através de ensaios de permeabilidade, filtração e porosidade da torta de filtração, quando submetidos a altas pressões usando o aparato experimental localizado no Laboratório de Controle Ambiental no Departamento de Engenharia Química da UFSCar e talco como material particulado. As condições de trabalho para realização dos experimentos foram as pressões de 93, 193, 293, 393 e 493kPa, para os ensaios de permeabilidade, e 93, 293 e 493kPa, para os ensaios de filtração. Nos ensaios de permeabilidade, variou-se a velocidade superficial do gás de 0 a 0,25m/s, enquanto que nos ensaios de filtração as velocidades superficiais de filtração foram de 5 e 6 cm/s. A determinação da porosidade da torta foi realizada através de correlações matemáticas. Observou-se a partir dos resultados obtidos, que as constantes de permeabilidade calculadas para ambos os meios filtrantes puderam ser consideradas constantes com a pressão. Para os ensaios de filtração pôde-se observar que com o aumento da pressão do sistema houve um aumento da massa retida pelos meios filtrantes para uma mesma queda de pressão, não havendo variação significativa com as velocidades de filtração estudadas. Também foi observado um aumento da porosidade e uma diminuição da resistência da torta de filtração a medida que a pressão do sistema foi aumentada.

Palavras Chave: Filtração de gases a altas pressões, Filtro de celulose, Permeabilidade, Porosidade.

ABSTRACT

The gas filtration process has several advantages, such as to prevent damage to the environment and health of living beings and to avoid damage in the equipment used in various industrial processes. The filter media applied in these processes can be made of various materials, including metal, fiberglass, polypropylene, polyester and cellulose, with the latter being highlighted by its low cost. The objective of this study is to evaluate the performance of the cellulose filters RAD + and RAD Plus, through permeability, filtration and porosity of the filter cake tests, when subjected to high pressures using the experimental apparatus located in the Environmental Control Laboratory in the Chemical Engineering Department at UFSCar and talc as particulate matter. The working conditions used in the experiments were pressures of 93, 193, 293, 393 and 493kPa, for the permeability tests, and 93, 293 and 493kPa, for the filtration tests. In the permeability tests, the superficial velocity of the gas was varied from 0 to 0.25m/s, while in the filtration tests, the velocities of filtration were 0.05 and 0.06 m/s. The porosity of the cake filtration was determined by mathematics correlations. The permeability constants calculated for both filter media could be considered constant with pressure. For filtration assays, it could be observed that increasing the pressure of the system was the mass withheld by filter media increased for the same pressure drop, without any significant variation with the filtration velocities studied. It was also observed an increase in porosity and a decrease in the resistance of cake filtration when the system pressure was raised.

Keywords: High pressures gas filtration, Cellulose filter, Permeability, Porosity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Filtração de gases	20
Figura 3.2 Separadores tipo cesto e tipo cartucho	28
Figura 3.3 Imagem obtida de microscópio eletrônico de varredura da superfície de entrada do meio filtrante RAD + (a) e RAD Plus (b) aumentadas 88 vezes	29
Figura 4.1 Equipamento de filtração utilizado	31
Figura 4.2 Linha de ar secundário. Filtro de linha e secador de ar a base de sílica	32
Figura 4.3 Sistema de alimentação de material particulado utilizado nos ensaios de filtração	33
Figura 4.4 Ilustração do suporte de filtro e imagem do sistema real.....	33
Figura 4.5 Sistema de aquisição de dados	34
Figura 4.6 Interface do software de aquisição de dados.....	34
Figura 4.7 Imagem obtida de microscópio eletrônico de varredura da superfície de entrada do meio filtrante RAD + (a) e RAD Plus (b) aumentadas 150 vezes.....	36
Figura 4.8 Distribuição granulométrica do talco obtida pelo equipamento Malvern MasterSizer MicroPlus.	37
Figura 5.1 Ajuste polinomial da curva $\Delta P \times v$ para o meio filtrante RAD +.....	40
Figura 5.2 Ajuste polinomial da curva $\Delta P \times v$ para o meio filtrante RAD Plus.....	41
Figura 5.3 Constante de permeabilidade k_1 para os meios filtrantes RAD + e RAD Plus	42
Figura 5.4 Constante de permeabilidade k_2 para os meios filtrantes RAD + e RAD Plus	42
Figura 5.5 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	44
Figura 5.6 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s	45
Figura 5.7 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 93 kPa com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	46
Figura 5.8 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 293 kPa com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	46
Figura 5.9 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 493 kPa com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	47
Figura 5.10 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 6 cm/s	48
Figura 5.11 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	48
Figura 5.12 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 93 kPa com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	49
Figura 5.13 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 293 kPa com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	50

Figura 5.14 Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 493 kPa com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	50
Figura 5.15 Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD + para as pressão de 93 kPa.....	51
Figura 5.16 Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD + para as pressão de 293 kPa.....	52
Figura 5.17 Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD + para as pressão de 493 kPa.....	52
Figura 5.18 Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD Plus para as pressão de 93 kPa	53
Figura 5.19 Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD Plus para as pressão de 293 kPa	53
Figura 5.20 Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD Plus para as pressão de 493 kPa	54
Figura 5.21 Resistência específica das tortas de filtração utilizando o meio filtrante RAD +	55
Figura 5.22 Resistência específica das tortas de filtração utilizando o meio filtrante RAD Plus	55
Figura 5.23 Resistência específica das tortas para a velocidade de filtração de 5 cm/s	56
Figura 5.24 Resistência específica das tortas para a velocidade de filtração de 6 cm/s	56
Figura 5.25 Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 5 cm/s utilizando o meio filtrante RAD +.....	57
Figura 5.26 Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 6 cm/s utilizando o meio filtrante RAD +.....	58
Figura 5.27 Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 5 cm/s utilizando o meio filtrante RAD Plus	59
Figura 5.28 Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 6 cm/s utilizando o meio filtrante RAD Plus	59
Figura 5.29 Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo Ergun	60
Figura 5.30 Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo Rudnick-Happel.....	60
Figura 5.31 Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo MacDonald	61
Figura 5.32 Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo Endo.....	61
Figura 5.33 Penetração do talco através do meio filtrante RAD + nos ensaios de filtração ...	62
Figura 5.34 Penetração do talco através do meio filtrante RAD Plus nos ensaios de filtração.....	63
Figura 5.35 Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s	64
Figura 5.36 Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 6 cm/s	64

Figura 5.37 Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 5 cm/s	65
Figura 5.38 Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 6 cm/s	66
Figura 5.39 Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s.	66
Figura 5.40 Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Propriedades dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus fornecidas pelo fabricante	35
Tabela B.1 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 93 kPa	74
Tabela B.2 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 193 kPa	75
Tabela B.3 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 293 kPa	75
Tabela B.4 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 393 kPa	75
Tabela B.5 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 493 kPa	76
Tabela B.6 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 93 kPa	76
Tabela B.7 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 193 kPa	76
Tabela B.8 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 293 kPa	77
Tabela B.9 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 393 kPa	77
Tabela B.10 Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 493 kPa	77
Tabela B.11 Constantes de permeabilidade k_1 para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus	78
Tabela B.12 Constantes de permeabilidade k_2 para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus	78
Tabela B.13 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD +.....	78
Tabela B.14 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD +.....	79
Tabela B.15 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD +.....	79
Tabela B.16 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD Plus	80
Tabela B.17 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD Plus	80
Tabela B.18 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD Plus	81
Tabela B.19 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD +.....	82

Tabela B.20 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD +.....	82
Tabela B.21 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD +.....	83
Tabela B.22 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD Plus	83
Tabela B.23 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD Plus	84
Tabela B.24 Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD Plus	84
Tabela B.25 Resistência específica da torta, kc, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	85
Tabela B.26 Resistência específica da torta, kc, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	85
Tabela B.27 Porosidade calculada pela correlação de Ergun, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s..	85
Tabela B.28 Porosidade calculada pela correlação de Ergun, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s..	86
Tabela B.29 Porosidade calculada pela correlação de Rudnick-Happel, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	86
Tabela B.30 Porosidade calculada pela correlação de Rudnick-Happel, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	86
Tabela B.31 Porosidade calculada pela correlação de Endo, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s..	86
Tabela B.32 Porosidade calculada pela correlação de Endo, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s..	86
Tabela B.33 Porosidade calculada pela correlação de MacDonald, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	87
Tabela B.34 Porosidade calculada pela correlação de MacDonald, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	87
Tabela B.35 Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s.....	87
Tabela B.36 Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 6 cm/s.....	87

NOMENCLATURA

A – Área de filtração	[L ²]
c – Fator de correção de Cunningham	[-]
d _p – Diâmetro médio das partículas	[L]
E – Eficiência do meio filtrante	[-]
k ₁ – Constante de permeabilidade Darciana	[L ²]
k ₂ – Constante de permeabilidade não Darciana	[L]
k _C – Resistência específica da torta	[t ⁻¹]
k _m – Resistência específica do meio filtrante	[ML ² t ⁻¹]
L – Espessura do meio filtrante	[L]
m _R – Massa de partículas retida no meio filtrante	[M]
m _T – Massa total de partículas	[M]
N _R – Número de partículas retidas no meio filtrante por unidade de tempo	[-]
N _T – Número total de partículas por unidade de tempo	[-]
P – Pressão absoluta	[ML ⁻¹ t ⁻²]
P _i – Pressão medida antes do meio filtrante	[ML ⁻¹ t ⁻²]
P _o – Pressão medida depois do meio filtrante	[ML ⁻¹ t ⁻²]
P _R – Pressão de referência	[ML ⁻¹ t ⁻²]
Q – Vazão volumétrica de gás	[L ³ t ⁻¹]
T – Temperatura absoluta	[T]
t – Tempo de filtração	[t]
T _R – Temperatura de referência	[T]
v _s – Velocidade superficial do gás	[Lt ⁻¹]
W – Massa de pó depositada por unidade de área	[ML ⁻²]
ΔP _C – Queda de pressão na torta de filtração	[ML ⁻¹ t ⁻²]
ΔP _M – Queda de pressão do meio filtrante	[ML ⁻¹ t ⁻²]
ΔP _T – Queda de pressão total	[ML ⁻¹ t ⁻²]
ε – Porosidade do meio filtrante	[-]
μ – Viscosidade do gás	[ML ⁻¹ t ⁻²]
ρ – Densidade do gás	[ML ³]
ρ _p – Densidade da partícula	[ML ³]

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	177
2. OBJETIVOS	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Filtração de gases	20
3.1.1. Permeabilidade.....	22
3.1.2. Queda de pressão	23
3.1.3. Porosidade.....	24
3.1.4. Eficiência do meio filtrante.....	26
3.1.5. Filtração a altas pressões.....	27
3.2. Meio Filtrante de Celulose	28
3.3. Material particulado - Talco	30
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1. Equipamento de filtração	32
4.2. Meio filtrante e material particulado.....	36
4.3. Metodologia dos ensaios	37
4.3.1. Ensaios para determinação da Permeabilidade	38
4.3.2. Ensaios de Filtração	38
4.3.3. Resistência específica e Porosidade da torta de filtração	39
4.3.4. Penetração do material particulado nos meios filtrantes	39
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1. Permeabilidade dos meios filtrantes.....	40
5.2. Ensaios de filtração	43
5.2.1. Queda de pressão no meio filtrante	44
• Filtração com velocidade superficial fixa de 5 cm/s	44
• Filtração com velocidade superficial fixa de 6 cm/s	48
• Comparação entre as velocidades de filtração de 5 cm/s e 6 cm/s .	51
5.2.2. Resistência específica da torta.....	55
5.2.3. Porosidade da torta de filtração.....	58
5.2.4. Penetração do material particulado	64
5.2.3. Relação entre os parâmetros de desempenho	67
6. CONCLUSÕES.....	71
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	72
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

APÊNDICE A – PROBLEMAS ENCONTRADOS.....	76
APÊNDICE B – DADOS EXPERIMENTAIS.....	77

1. INTRODUÇÃO

O material particulado presente na atmosfera é proveniente em sua maioria da queima de combustíveis fósseis a fim de gerar energia, tanto para transporte, aquecimento e produção industrial. Segundo Johansson et al. (2007) veículos movidos a combustíveis fósseis são a principal fonte antropogênica de partículas em áreas urbanas, chegando a cerca de 90%. Já nas indústrias, o material particulado é emitido em decorrência das operações de estocagem, manuseio e transporte de matérias-primas e, principalmente, pela queima de combustíveis utilizados nas várias etapas do processo produtivo (BRASIL, 1990 *apud* JACOMINO ET AL., 2009). Queiroz et al. (2006) e Jacomino et al. (2009) consideraram, a partir de análises da granulometria do material particulado, que o diâmetro aerodinâmico da maior parte do material emitido pelo ramo siderúrgico, de materiais de limpeza, de cerâmica, cimenteira e de tecidos, era menor que 10 µm.

Essas partículas contribuem para o desencadeamento de uma série de doenças, pois quando sua concentração no ar aumenta, sérios problemas de saúde acabam ocorrendo ao homem, já que seu trato respiratório pode acabar sendo atingido, podendo ser seriamente afetado. Além do efeito direto causado ao ser humano, as partículas são prejudiciais à vegetação e ao solo, além de ocasionarem alterações das propriedades da atmosfera (LORA, 2002).

Para que não haja efeitos nocivos à saúde é necessária a mínima emissão de poluentes à atmosfera, já que deixar de emití-los é impossível do ponto de vista produtivo. Uma forma recorrente hoje em dia é a busca de novas tecnologias e combustíveis mais limpos, onde a utilização do gás natural se torna uma boa alternativa. A principal vantagem desse combustível, em comparação aos combustíveis derivados do petróleo ou biomassa, é o fato de ele possuir uma queima completa na combustão, ou seja, libera menos poluentes como monóxidos e óxidos de carbono, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre, que são alguns dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa. (ALONSO, 1999).

O gás natural é de origem fóssil e é encontrado distante dos centros consumidores. Por isso, deve ser transportado do seu local de origem até o local onde será consumido. A forma mais comum de transporte do gás é através de gasodutos, onde, basicamente, o gás será enviado a longas distâncias pressurizado. Para que esse gás chegue ao seu destino com a mesma qualidade, ele deve ser purificado, haja vista que durante o percurso há o despreendimento de resíduos e impurezas no interior dos dutos. O processo utilizado nesse ramo industrial é a filtração á altas pressões.

Do ponto de vista industrial, as partículas podem ser danosas também aos processos em si, alterando propriedades ou até o produto final, bem como obstruindo e danificando diversos equipamentos. Esses fatores tornam a filtração uma etapa importante em qualquer processo, caso também do gás natural. Por isso, dentre as muitas formas para diminuição da emissão das partículas para atmosfera ou para a limpeza de um gás em processos industriais está o uso de meios filtrantes para a captura das mesmas. Exemplos de fibras utilizadas na confecção dos meios são: as metálicas, de vidro, de polipropileno, de poliéster, de celulose entre outros.

Este trabalho visa avaliar o desempenho de dois meios filtrantes diferentes de celulose e a influência da pressão no processo de filtração de gases usando o talco como material particulado, buscando as melhores alternativas para retenção de partículas nos processos industriais. O meio filtrante de celulose foi escolhido pelo seu baixo custo e o talco puro, como material particulado, por ser leve o bastante para ser arrastado pelo fluxo de gás no interior do equipamento e por ser amplamente utilizado em processos industriais, como na indústria química e farmacêutica.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho foi avaliar o desempenho de dois meios filtrantes de celulose, RAD + e RAD Plus, quando submetidos à filtração de gases a altas pressões usando o talco puro como material particulado.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar permeabilidade dos meios filtrantes e sua variação com a pressão do sistema;
- Avaliar o efeito da pressão nos ensaios de filtração para os meios filtrantes estudados;
- Avaliar o efeito da velocidade de filtração nos ensaios de filtração para os meios filtrantes estudados;
- Avaliar resistência específica da torta de filtração formada para cada ensaio de filtração realizado;
- Calcular a porosidade da torta de filtração formada em cada ensaio por diferentes métodos;
- Avaliar a penetração do material particulado em cada meio filtrante estudado;
- Comparar os resultados dos meios filtrantes estudados.

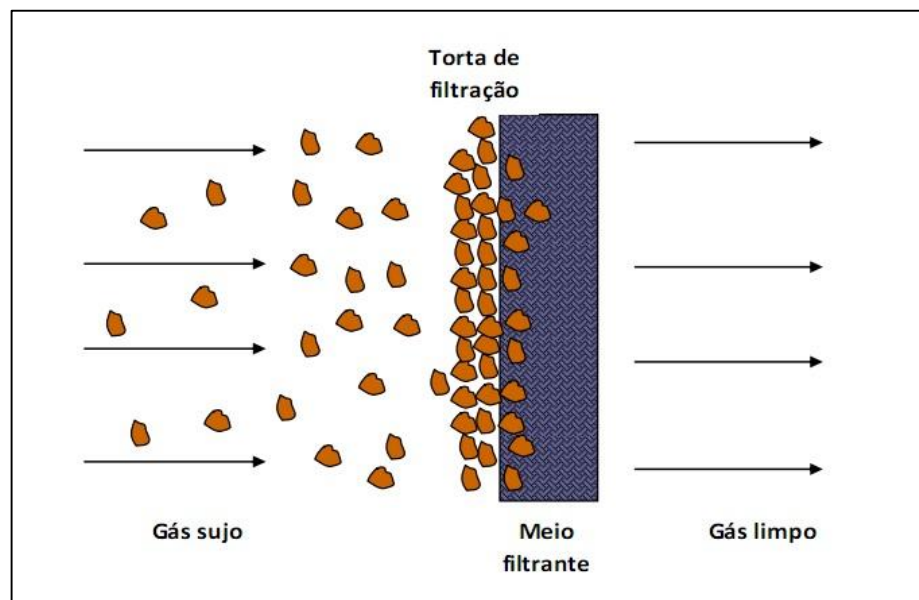
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa seção visa apresentar os estudos científicos relacionados ao processo de filtração de gases a pressão ambiente e a altas pressões, bem como as características, vantagens, desvantagens e aplicações deste processo, assim como dos materiais que foram utilizados para realização do trabalho.

3.1. Filtração de gases

A filtração de gases é uma operação de separação do gás-sólido, que ocorre pela passagem do fluido e das partículas através de um meio poroso. O meio filtrante captura os sólidos por contato, processo este que se denomina filtração interna ou de profundidade. Conforme o tempo decorre, esse sólido forma uma camada no meio filtrante, conhecida como torta de filtração. A torta é responsável pela captura das partículas superficialmente, sendo este processo denominado de filtração superficial (DULLIEN,1989). A Figura 3.1 ilustra a filtração de gases.

Figura 3.1. Filtração de gases.



Fonte: TANABE (2011).

As vantagens do processo de filtração de gases em processos industriais vão desde a limpeza do gás a ser liberado na atmosfera até purificação do mesmo dentro de uma

operação. A consequência disso é uma menor poluição do ar e menor dano ao meio ambiente, aos seres que o habitam e aos processos industriais e de transporte. Além disso há também a diminuição de custos do processo, tanto em recuperação de um determinado gás ou uma determinada partícula de interesse, como em manutenção de equipamentos, já que as partículas presentes no fluxo gasoso em um processo podem vir a provocar corrosão e entupimentos (SILVA ET AL., 2002).

Os fatores que interferem no desempenho e na viabilidade desse sistema de coleta são a característica do meio filtrante, a característica do material a ser coletado, a velocidade de filtração, as propriedades do gás, a espessura da torta formada e as variáveis do processo (temperatura, pressão, umidade, etc). Segundo Dullien (1989), o desempenho do sistema de filtração pode ser descrito pela eficiência de coleta e pela queda de pressão. Para um bom desempenho espera-se uma alta eficiência de coleta e uma baixa queda de pressão.

Os meios filtrantes usados na separação gás-sólido podem ser constituídos de vários materiais, podendo ser de fibras naturais, artificiais e sintéticas. A estruturação das fibras desses meios filtrantes os classifica como meios filtrantes trançados ou meios filtrantes não trançados. Os trançados são produzidos pelo entrelaçamento de um conjunto de fios perpendicularmente. Esse tipo de meio pode ser totalmente trançado ou parcialmente trançado. Os meios filtrantes não trançados, também chamados de feltros, são constituídos de uma estrutura plana, porosa e flexível. Seus fios podem ter a mesma orientação ou orientação aleatória. Esse tipo de filtro é indicado para materiais particulados mais pesados e possui maior quantidade de poros por unidade de área que os trançados (TANABE, 2011).

Os materiais utilizados para o processo de filtração podem ser fibra de vidro, lã, algodão, poliéster, polipropileno, celulose, fios metálicos entre outros. Os filtros de celulose são constituídos de materiais fibrosos não trançados feitos de fibras orgânicas aleatórias. Em sua maioria são usados na forma plissada, permitindo uma maior área filtrante, maior vida útil e maior capacidade de retenção de sólidos. Já os filtros metálicos, são confeccionados de fibras de aço inox na forma trançada. Esse tipo de filtro não é compressível quando submetido a altas pressões, podendo suportar até 13,8 MPa. Suas propriedades físicas o tornam reutilizável, porém, a um custo maior (RICCO, 2009).

O desempenho desses meios filtrantes pode ser determinado analisando-se características como permeabilidade, queda de pressão, eficiência de coleta e porosidade. Estes parâmetros são descritos a seguir considerando o uso do sistema internacional de unidades nas correlações matemáticas (as dimensões de cada parâmetro pode ser encontrada na lista de símbolos deste trabalho).

3.1.1. Permeabilidade

Esse parâmetro indica a dificuldade da passagem de gás pelo meio filtrante. Ou seja, filtros com baixa permeabilidade têm uma passagem de gás mais dificultada do que filtros com alta permeabilidade, implicando em baixas taxas de filtração. Pode-se dizer que a permeabilidade é uma propriedade de interação entre o meio e o gás, pois ocorre a transformação de energia do sistema, na forma de queda de pressão (INNOCENTINI ET AL., 2005).

A permeabilidade pode ser descrita matematicamente, de acordo com algumas equações encontradas na literatura, como por exemplo a equação de Forchheimer para fluidos compressíveis, que relaciona a queda de pressão com a velocidade superficial do fluido (SILVA, ET AL., 1999):

$$\frac{P_i^2 - P_o^2}{2P_i L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (3.1)$$

Na equação, P_i e P_o são as pressões absolutas antes e depois do meio filtrante, L é a sua espessura, μ é a viscosidade do fluido, ρ é a densidade do fluido, k_1 e k_2 são as constantes de permeabilidade Darciana e não-Darciana e v_s é a velocidade superficial do gás. A velocidade superficial do gás é função da vazão de gás, da área de filtração, da pressão e da temperatura do sistema, como mostra a Equação 3.2.

$$v_s(T, P) = \frac{Q}{A} \frac{T}{T_R} \frac{P_R}{P} \quad (3.2)$$

Na equação, T e P são a temperatura e a pressão absoluta do sistema, respectivamente, Q é a vazão de gás medida pelo rotâmetro, A , a área de filtração e, T_R e P_R , a temperatura e a pressão de referência, respectivamente. Normalmente usa-se a temperatura do sistema e a temperatura de referência como sendo as mesmas, uma vez que esta variação é pequena.

O primeiro termo do lado direito da igualdade da Equação 3.1 é referente às forças viscosas atuantes sobre a queda de pressão, devido ao atrito do fluido com o meio filtrante durante o processo de filtração. O segundo, refere-se às forças inerciais, devido a turbulências no sistema. Nota-se que o termo viscoso se sobressai para baixas velocidades superficiais, pois

a energia é dissipada na forma de atrito entre as camadas do fluido. Com o aumento da velocidade, o escoamento tende ao regime turbulento, tornando o termo inercial mais presente (INNOCENTINI ET AL., 2005).

Ricco (2009) e Tanabe (2011) constataram em seus estudos que a permeabilidade do meio filtrante de celulose não sofreu alterações significativas com a variação da pressão do sistema, podendo esta ser considerada constante.

3.1.2. Queda de Pressão

A queda de pressão é o parâmetro responsável por descrever a resistência do fluxo ao transpor o meio filtrante. Matematicamente, nada mais é do que a diferença entre a pressão absoluta medida antes do filtro e a pressão absoluta medida depois do filtro. Esse parâmetro é importante para determinar a frequência de limpeza ou troca do meio filtrante, pois seu aumento indica um aumento na deposição de partículas, causando diminuição no rendimento (JEON e JUNG, 2004).

Nos processos de filtração a queda de pressão é dada pela Equação 3.3.

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_C \quad (3.3)$$

em que ΔP_T é queda de pressão total, ΔP_M é a queda de pressão do meio filtrante e ΔP_C é a queda de pressão na torta de filtração. Essa equação pode ser reescrita na forma da Equação 3.4.

$$\Delta P_T = k_m v_s + k_C v_s W \quad (3.4)$$

em que k_m é a resistência específica do meio filtrante, v_s é a velocidade superficial do gás, k_C é resistência específica da torta e W é a massa de pó depositada por unidade de área.

A partir da Equações 3.3 e 3.4 é possível determinar então a resistência específica da torta como mostra a Equação 3.5 (LEITH e ALLEN, 1986).

$$\frac{\Delta P_C}{v_s} = k_C W \quad (3.5)$$

Tanabe (2011) e Franco (2012), utilizando a rocha fosfática como material particulado em trabalhos anteriores, observaram um aumento da massa de material particulado

depositado no meio filtrante de celulose com o aumento da pressão absoluta do sistema para uma mesma queda de pressão. Tanabe (2011) também notou um decréscimo da resistência específica da torta de filtração com o aumento da pressão do sistema.

3.1.3. Porosidade

A porosidade é um parâmetro tanto do meio filtrante quanto da torta de filtração. No primeiro caso, ela consiste na proporção de espaços vazios do meio, e na segunda, na proporção de espaços vazios na torta formada durante o processo de filtração. Esse parâmetro tem relação direta com a eficiência de coleta e queda de pressão.

Para a torta de filtração existem dois métodos para determinação da porosidade, o método indireto, por meio de equações, e o método direto, por meio de análise de imagens. Para o método indireto existem diversas correlações, entre elas a definida por Ergun (1952), onde pode-se estimar a queda de pressão de um leito poroso através do escoamento de um fluido, como também é possível determinar a porosidade através de dados da queda de pressão e tempo de filtração. A Equação 3.6 apresenta a correlação de Ergun modificada (ERGUN, 1952 *apud* FARGNOLI, 2010).

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{150(1 - \varepsilon) \mu Q v_s}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} + \frac{1,75 Q \rho_g v_s^2}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p} \quad (3.6)$$

em que ε é a porosidade do meio filtrante, t é o tempo de filtração, ρ_p é a densidade da partícula, ρ_g é a densidade do gás e d_p é o diâmetro médio das partículas.

Rudnick e First (1978) descreveram a queda de pressão da torta a partir do modelo de célula de Happel. Esse modelo trata a torta de filtração como uma associação de partículas, onde cada partícula é envolta por uma casca esférica concêntrica. A porosidade nesse caso é dada pela razão entre o volume da casca e o volume da partícula (CHENG e TSAI, 1998). A Equação 3.7 apresenta a correlação de Rudnick-Happel, baseada nesta teoria.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{18 \mu v_s}{d_p^2 c} \frac{3 + 2(1 - \varepsilon)^{\frac{5}{3}}}{3 - 4,5(1 - \varepsilon)^{\frac{1}{3}} + 4,5(1 - \varepsilon)^{\frac{5}{3}} - 3(1 - \varepsilon)^2} + \frac{Q}{A \rho_p} \quad (3.7)$$

Nessa correlação, c refere-se ao fator de correção de Cunningham, que pode ser encontrado nos trabalhos de Allen (2003) e Tanabe (2011).

MacDonald et al. (1979) modificaram a equação de Ergun considerando a rugosidade das partículas utilizando coeficientes matemáticos. A Equação 3.8 apresenta a correlação de MacDonald para partículas irregulares.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{180(1 - \varepsilon) Q \mu v_s}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p^2} + \frac{4Q \rho_g v_s^2}{\varepsilon^3 A \rho_p d_p} \quad (3.8)$$

Endo et al. (1998) descreveram uma equação onde se considera o formato e homogeneidade das partículas. A Equação 3.9 apresenta a correlação de Endo.

$$\frac{\Delta P}{t} = \frac{180\kappa(1 - \varepsilon) \mu v_s Q}{\varepsilon^3 d_p^2 \exp(\ln^2 \sigma_G) A \rho_p} \quad (3.9)$$

em que κ é o fator de forma da partícula e σ_G é o desvio padrão do diâmetro geométrico da partícula. O cálculo do fator de forma, segundo Allen (2003), e do desvio citado se dão pelas Equações 3.10 e 3.11, respectivamente.

$$\kappa = \left(\frac{d_v}{d_{st}} \right)^2 \quad (3.10)$$

$$\sigma_G = \frac{d_{84,13\%}}{d_{50\%}} \quad (3.11)$$

Em que d_v é o diâmetro médio volumétrico, d_{st} o diâmetro médio de Stokes, $d_{84,13\%}$ o diâmetro médio das partículas para 84,13% do total do volume, ou seja, 84,13% das partículas de toda a amostra possuem diâmetro abaixo, e $d_{50\%}$ o diâmetro médio geométrico.

Segundo Pitch (1987) a eficiência aumenta de acordo com a diminuição da porosidade, para meios filtrantes com porosidade alta. Porém, a queda de pressão também aumenta, tornando a filtração desvantajosa. Em seu trabalho, Tanabe (2011) observou um aumento da porosidade a medida que a pressão do sistema aumentou utilizando a rocha fosfática como material particulado. Para o meio filtrante de celulose, Tanabe (2011) obteve os melhores resultados para o correlação de Rudnick-Happel quando comparados com valores experimentais, utilizando a rocha fosfática como material particulado. Castro (2012) observou

uma maior compactação da torta nas proximidades do meio filtrante, independente da pressão do sistema e também um aumento da porosidade das tortas formadas quando variou-se a pressão do sistema.

3.1.4. Eficiência de coleta do meio filtrante

Eficiência de coleta de partículas pode ser definida como a razão entre a quantidade de partículas retidas no meio filtrante pela quantidade total de partículas presentes na corrente gasosa antes de sua passagem pelo meio filtrante, durante o processo de filtração. A Equação 3.12 mostra a eficiência calculada em relação ao número de partículas e a Equação 3.13, em relação à massa de partículas.

$$E = \frac{N_R}{N_T} * 100 (\%) \quad (3.12)$$

$$E = \frac{m_R}{m_T} * 100 (\%) \quad (3.13)$$

em que E é a eficiência do meio filtrante, N_R é o número de partículas retidas no meio filtrante, N_T é o número total de partículas, m_R a massa de partículas retida no meio filtrante e m_T a massa total de partículas, todas mensuradas num certo período de tempo durante o processo.

A eficiência pode ser determinada utilizando-se outras variáveis, como a porosidade do meio filtrante e da torta, sua espessura, etc. Diversas correlações deste tipo podem ser encontradas na literatura (TANABE, 2011).

Em trabalhos anteriores, Tanabe (2011) concluiu que a eficiência dos meios filtrantes aumenta com o aumento da pressão do sistema, levando em consideração partículas menores que 5 μm . Portanto, para pressões maiores, menos partículas passarão pelos meios filtrantes para as mesmas condições de processos.

3.1.5. Filtração a altas pressões

Poucos são os processos onde a pressão do sistema de filtração é alta. Um dos casos é a filtração do gás natural. O gás natural de origem fóssil é encontrado distante dos centros consumidores. Por isso, deve ser transportado do seu local de origem até o local onde

será consumido. A forma mais comum de transporte do gás é através de gasodutos, onde, basicamente, o gás será enviado a longas distâncias, e, por isso, os dutos de transporte precisam estar pressurizados. Para que esse gás chegue ao seu destino com a mesma qualidade obtida na sua extração, ele deve ser purificado, uma vez que, durante o seu transporte nos gasodutos, ocorre a formação de partículas em suspensão. O chamado pó preto é resultado de reações químicas e da ação microbiana sobre a superfície interna do tubo, devido à presença de umidade e contaminantes ácidos como CO_2 e H_2S (PALL, 2009). Segundo este mesmo autor, o pó preto pode aparecer na forma de finas partículas ou sedimento sólido, quando seco, e na forma de uma substância semelhante ao piche, quando úmido. Sua composição inclui várias formas de sulfeto e óxido de ferro. Além do pó preto, podem também ser encontrados quartzo, ferro, hidrocarbonetos líquidos, carbonato de cálcio e outras impurezas no sistema de transporte do gás natural.

A presença do resíduo gera desgaste e redução da eficiência dos compressores, pode entupir válvulas e aumentar a rugosidade do duto se aderido à parede interna, provocando o aumento da potência necessária para o transporte do gás. Segundo Silva et al., (2002) a ação desse pó preto deve ser reduzida mediante uso de medidas preventivas, tal como injeção de inibidores e instalação de filtros e ciclones para retenção e remoção mecânica do mesmo.

Os vasos de pressão usados para filtração à altas pressões podem ser de dois tipos: cesto e cartucho. No filtro do tipo cesto a limpeza do gás ocorre de dentro pra fora, com o material particulado ficando retido no interior do cesto. Já no filtro do tipo cartucho ocorre a limpeza de fora pra dentro, onde as partículas ficam retidas na carcaça do equipamento. Ou seja, o primeiro possui dreno limpo e o segundo dreno sujo. Esses vasos, normalmente, possuem certo grau de filtração e, no Brasil, utilizam meios filtrantes de celulose impregnados com resina fenólica ou tela metálica para retenção das partículas (GASCAT, 2010). Segundo esse mesmo autor, os meios filtrantes de celulose possuem uma grande área filtrante, permitindo uma vida útil maior do equipamento e maior capacidade de retenção de sólidos. Os meios filtrantes metálicos são construídos em aço carbono e são indicados para pressões maiores. Os filtros do tipo cesto e cartucho são ilustrados na Figura 3.2.

Figura 3.2. Separadores tipo cesto e tipo cartucho.



Fonte: RICCO (2009).

Tanabe (2011) e Franco (2012) estudaram o processo de filtração de gases a altas pressões usando o mesmo equipamento utilizado neste trabalho. Nestes estudos, foi utilizada rocha fosfática como material particulado e realizadas análises de imagens para determinação da porosidade das tortas de filtração experimentalmente, além dos testes de permeabilidade, no caso do primeiro autor, e de testes de filtração do gás, no caso de ambos os autores.

3.2. Meio filtrante de celulose

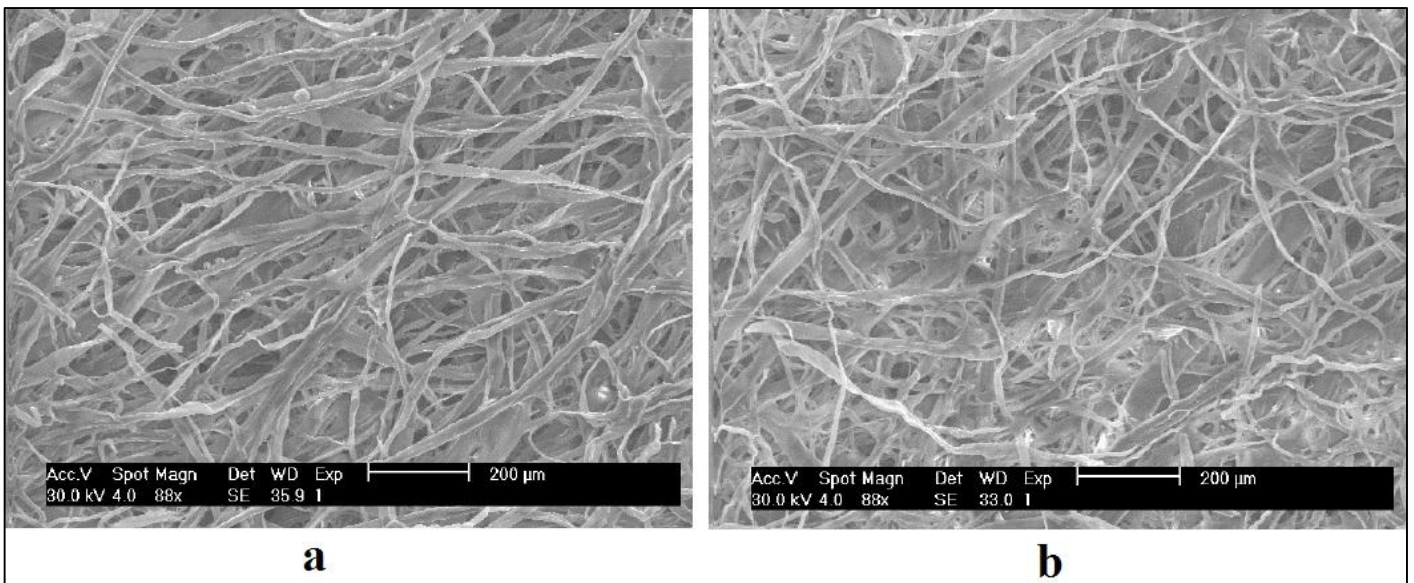
A celulose é um polímero de cadeia longa composto por um único monômero, classificado como polissacarídeo. Seu principal constituinte é a glicose, de fórmula molecular $(C_6H_{10}O_5)_n$. Essa substância é encontrada em quase todos os vegetais existentes, sendo a madeira um dos principais materiais usados para sua obtenção.

Um dos principais usos da matéria prima celulose é a fabricação de papel. O mesmo processo é usado também para fabricar meios filtrantes, pois estes nada mais são do que folhas de materiais fibrosos não trançados com orientação aleatória (SONG ET AL., 2006). Especificamente os meios filtrantes RAD + e RAD Plus, usados neste trabalho, são derivados de fibras de pinus e não tratados com aquecimento, como sugere seu fabricante para o uso de ar como gás. Sendo assim, possuem baixa resistência mecânica e menor capacidade de remoção de partículas finas se comparados aos meios filtrantes tratados (DICKENSON, 1989). Esses meios filtrantes são plissados, ou corrugados, como a maioria dos meios filtrantes de celulose, para que ocorra uma redução na velocidade do fluxo gasoso, evitando rupturas, e um aumento na área de contato entre meio e partículas.

Osório (2006), em seu trabalho, caracterizou os meios filtrantes RAD + e RAD Plus. Determinou a porosidade desses meios com um porosímetro Quantachrome Instruments Poremaster 33, e obteve valores de 0,71 para o RAD + e 0,70 para o RAD Plus. O mesmo autor, realizou filtrações utilizando o concentrado fosfático como material particulado. Para a pressão de 93 kPa, Osório (2006) observou, durante um ciclo de filtração, uma maior massa coletada de partículas pelo meio filtrante RAD Plus em comparação ao RAD + para uma mesma queda de pressão. A justificativa citada foi de que ocorreu o comportamento de filtração interna para o RAD +, com a penetração das partículas no interior das fibras, provocando uma formação mais lenta da torta de filtração, enquanto que o RAD Plus apresentou predominantemente um comportamento de filtração superficial.

A Figura 3.2 mostra imagens dos dois meios filtrantes obtidas pelo autor em um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 3.2. Imagem obtida de microscópio eletrônico de varredura da superfície de entrada do meio filtrante RAD + (a) e RAD Plus (b) aumentadas 88 vezes.



Fonte: OSÓRIO (2006).

3.3. Material Particulado - Talco

O talco é um filossilicato de magnésio hidratado, com fórmula molecular $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ou $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$. Tecnicamente é considerado um mineral, mas na prática é atribuído como rocha talcosa. No Brasil, muitos produtos comercializados como talcos podem conter diversos minerais em sua composição, acontecendo casos onde o talco

propriamente dito não seja o principal componente (CARVALHO, 2000). No caso do talco puro isso não ocorre.

Algumas das propriedades físicas do talco são: inodoro, não inflamável e insolúvel em água, em ácidos fracos e em álcalis. Sua densidade varia de 2,7 a 2,8 g/cm³ e sua estrutura é lamelar fibrosa ou compacta. O talco pode ser encontrado na forma bruta nas cores branco, verde, cinza, azul, rosa e até mesmo preto. Mas em geral é encontrado com a coloração branca (MINERALS YEARBOOK, 1980).

Na indústria o talco é usado em diversos ramos. As propriedades vantajosas para seu uso são alta resistência ao choque térmico (propriedade requerida na indústria cerâmica), leveza (propriedade requerida na indústria de papel), baixo teor de umidade, alto poder de absorção de óleo e graxa, baixa condutividade térmica, baixa condutividade elétrica (propriedade requerida na indústria cerâmica) e inércia química (propriedade requerida na indústria de papel, borracha). Também é usado como carga nas indústrias de tintas e vernizes, de produtos farmacêuticos e veterinários, sabonetes e sabões, defensivos agrícolas, e como pigmento também nas indústrias de tintas e vernizes, têxtil, entre outras (CAMPOS, 2001).

Souza Jr. et al. (2003) *apud* Fagnoli (2010) citam quatro tipos de doenças causadas pelo talco, sendo três proporcionadas pela aspiração do pó. A primeira ocorre quando se respira o talco puro, ocasionando a talcose, a segunda ocorre quando se respira talco com partículas de sílica em sua composição, ocasionando a talcossilicose, e a terceira ocorre quando se respira talco com fibras de asbesto em sua composição, ocasionando a talcoasbestose. O quarto tipo de doença está ligado ao contato do talco com o organismo via endovenosa.

Lucas (2000) e Fagnoli (2010) utilizaram o talco de diâmetro médio de Stokes de 5 µm como material particulado em ensaios de filtração além de outros materiais, como a rocha fosfática. O primeiro autor, observou maiores porosidades das tortas formadas com talco do que com a rocha, considerando partículas com densidade e granulometria semelhantes. A justificativa para tal acontecimento foi o fato da rocha fosfática possuir formato mais regular que o talco. O segundo autor observou uma maior deposição de partículas de talco do que da rocha, para as mesmas condições de filtração e também tortas de talco mais porosas. Fagnoli (2010) determinou a porosidade das tortas diretamente e indiretamente, chegando à conclusão que o método de Endo foi o que mais se distanciou do valor experimental e o método de Ergun o que mais se aproximou.

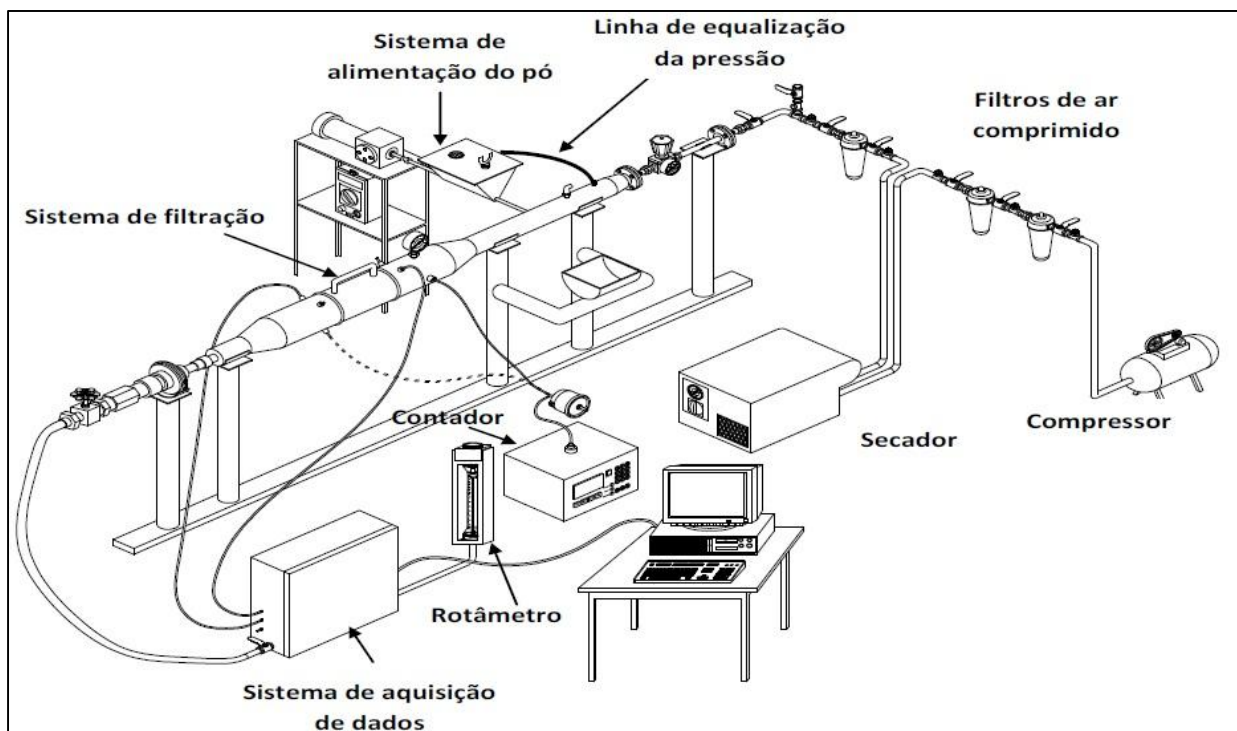
4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os equipamentos utilizados para execução do projeto, bem como o material particulado e os meios filtrantes aplicados no estudo. Os ensaios experimentais também serão descritos em seguida.

4.1. Equipamento de filtração

O equipamento utilizado nos experimentos pode ser observado na Figura 4.1 e é constituído, na sequência, de um compressor de ar comprimido, dois filtros coalescentes, um secador de ar, um terceiro filtro coalescente, um alimentador de material particulado do tipo rosca, o sistema de filtração, um filtro absoluto, o sistema de aquisição de dados e um rotâmetro.

Figura 4.1. Equipamento de filtração utilizado.



Fonte: TANABE (2011).

Além dessa linha principal há uma linha de ar secundário, como mostra a Figura 4.2, constituída por outro compressor, um filtro de linha e um secador de ar que utiliza sílica. O ar secundário é ligado ao sistema entre a linha de equalização de pressão e o alimentador de material particulado.

Figura 3.2. Linha de ar secundário. Filtro de linha e secador de ar a base de sílica.

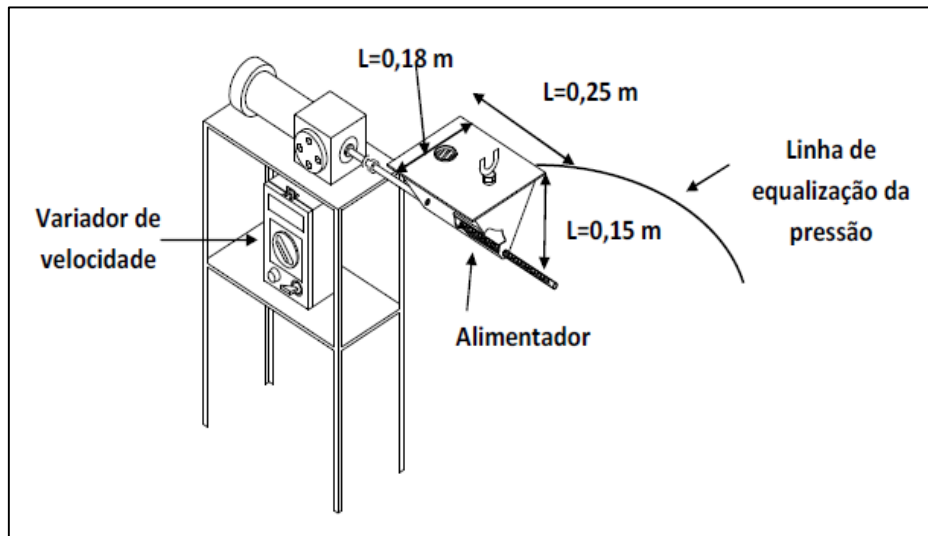


Fonte: ACERVO PESSOAL (2014).

Na linha de ar principal o compressor Atlas Copco LT2-15590TM pode fornecer uma vazão de até 216 L/min a uma pressão máxima de 15 bar. Os filtros coalescentes Apexfil, com pressão de operação máxima de 16 bar, foram instalados para que o fluxo gasoso passe pelo sistema de filtração e aquisição de dados livre de qualquer impureza indesejada. O secador Atlas Copco FX2, com pressão de operação máxima de 15 bar e vazão de 600 L/min, mantém a umidade do ar no interior da linha com baixas umidades, cerca de 30%, pois esta propriedade pode interferir nos resultados. O ar secundário é usado quando os experimentos necessitam de ajustes mais precisos, tanto na pressão do sistema como na vazão de ar.

O sistema de alimentação de sólidos é constituído de um reservatório de material particulado, um motor responsável pela inserção do pó no sistema através de uma rosca sem fim e um variador de velocidade para o ajuste da concentração nos ensaios de filtração. O motor possui 1 hp de potência, 3600 RPM e redução de 4 RPM. Esse sistema é representado na Figura 4.3.

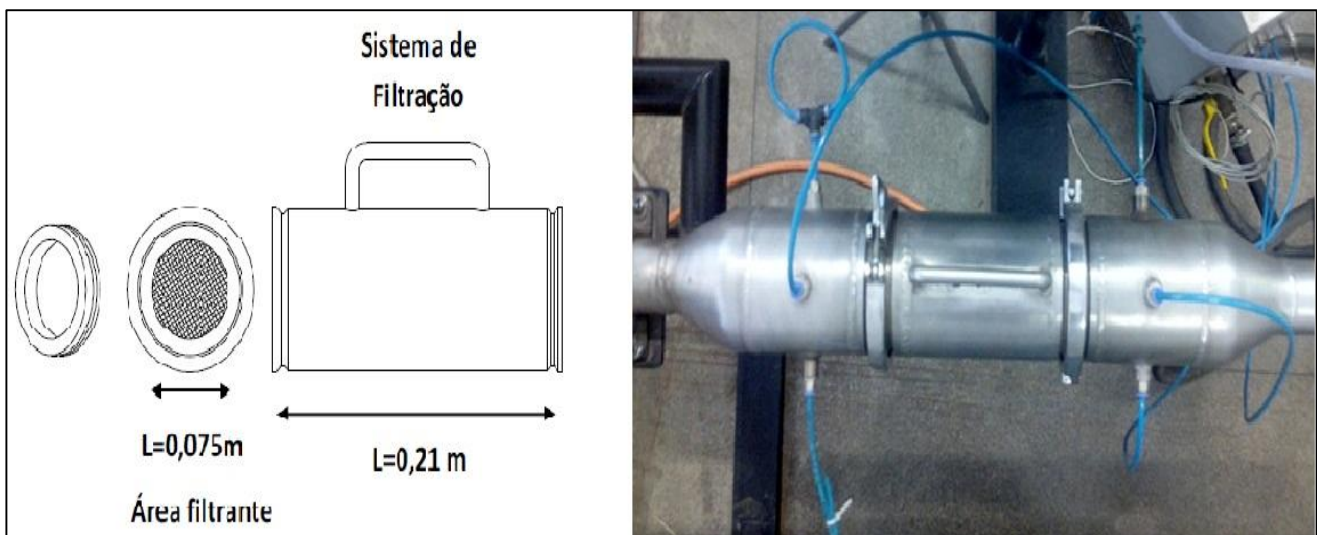
Figura 4.3. Sistema de alimentação de material particulado utilizado nos ensaios de filtração.



Fonte: TANABE (2011).

O sistema de filtração, mostrado na Figura 4.4, é composto de um suporte para o meio filtrante feito de tela metálica de 10 mesh, para que o mesmo não deforme durante o processo de filtração. A área de filtração do equipamento é de 44 cm^2 .

Figura 4.4. Ilustração do suporte de filtro e imagem do sistema real.

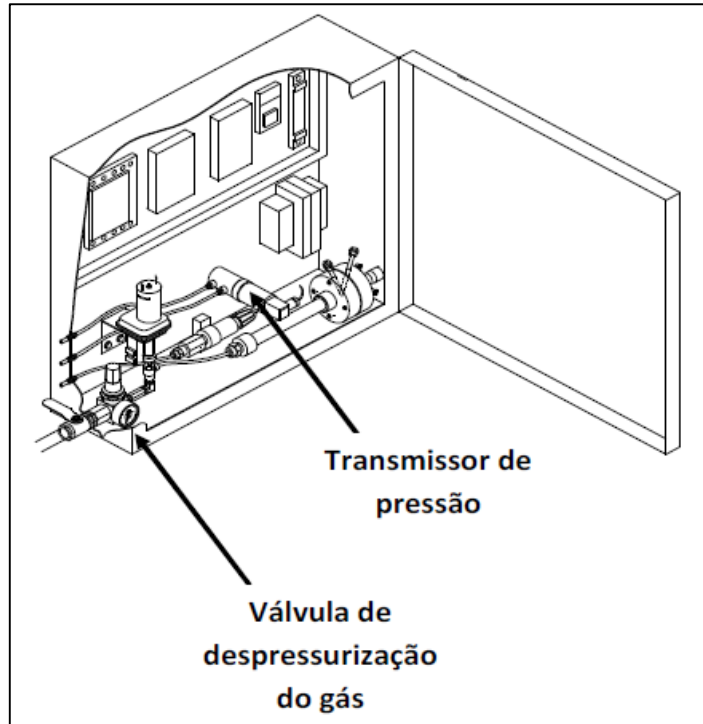


Fonte: TANABE (2011) e ACERVO PESSOAL (2014)

A aquisição dos dados de queda de pressão no meio filtrante é realizada por um transmissor de pressão diferencial Novus 62, com máxima operação de 100 mbar e precisão de 0,5% na escala de fundo. A mensuração desses dados é realizada pelo software de aquisição

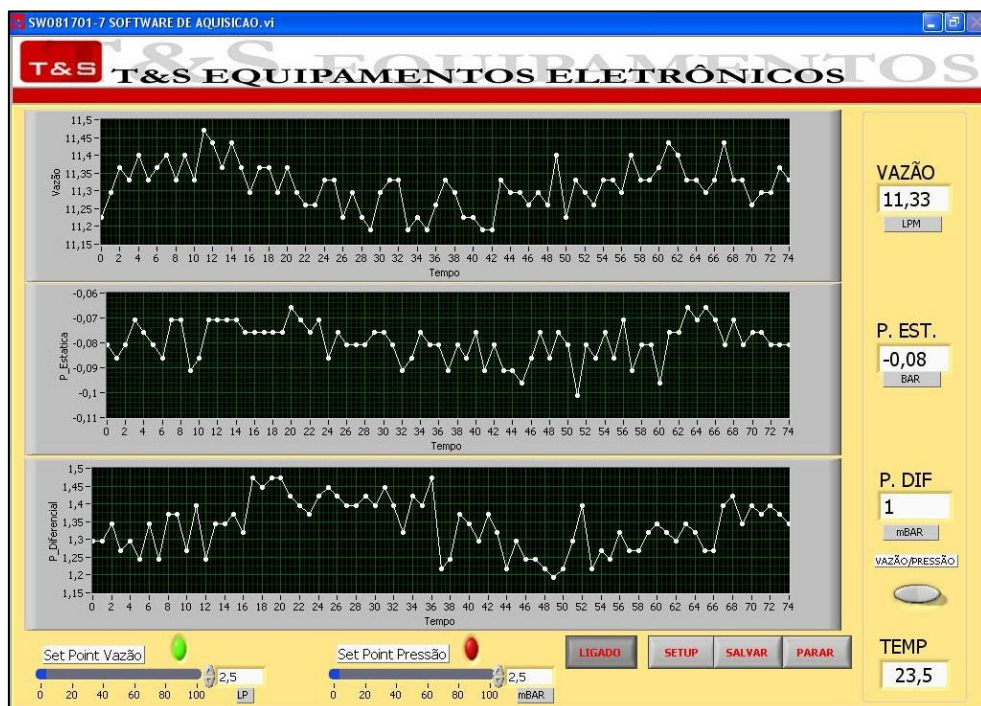
fornecido pela empresa TS Equipamentos Eletrônicos. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram o sistema de aquisição e de mensuração dos dados, respectivamente.

Figura 4.5. Sistema de aquisição de dados.



Fonte: TANABE (2011).

Figura 4.6. Interface do software de aquisição de dados.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2014).

A vazão da corrente gasosa foi mensurada por um rotômetro da marca Gilmont Instruments Cat. No. Size 5 Serial 50201-50300 com faixa de trabalho de 2,15 a 85,70 litros por minuto.

A quantidade de partículas que transpunha os meios filtrantes era mensurada por um contador de partículas Abakus Mobil Air do fabricante Klotz. Esse contador utiliza um sensor LDS 328s com uma faixa de análise de tamanho de partículas entre 0,3 e 20 μm e com concentração máxima de 2.000.000 partículas /L.

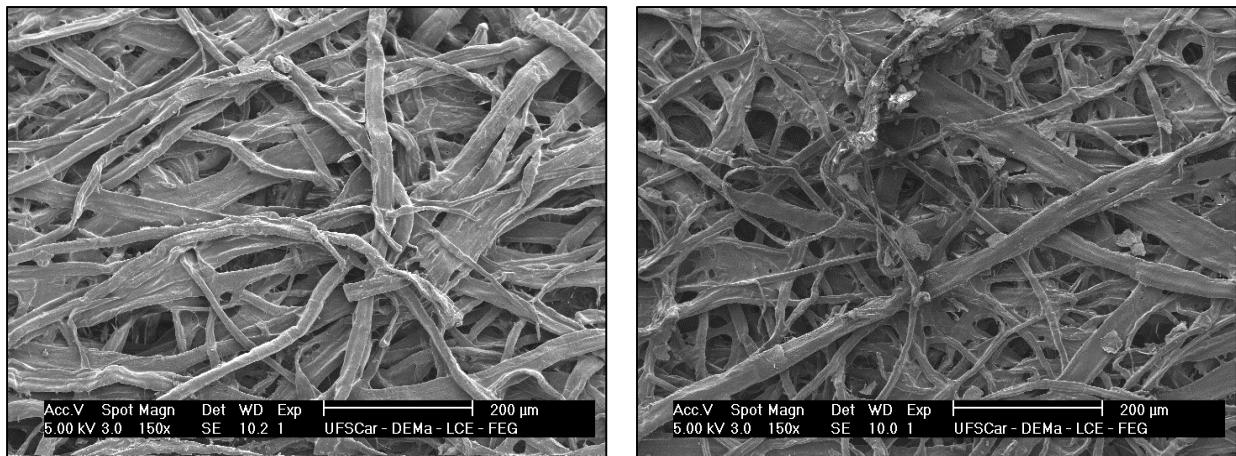
4.2. Meio filtrante e material particulado

O meio filtrante a ser utilizado nos experimentos é o de fibras de celulose. Esse material foi escolhido por sua capacidade de remover uma alta proporção de partículas finas a um baixo custo, apesar de não ser reutilizável como outros materiais filtrantes. Foram escolhidos o PFI 25-24 RAD + e o PFI 25-11 RAD Plus, ambos do fabricante Ahlstrom Brasil Indústria e Comércio de Papéis Especiais. Esses meios filtrantes são corrugados, impregnados com fenol e não são tratados térmicamente. Devido às dimensões do equipamento, a área útil desse filtro era de 44 cm^2 . A Tabela 4.1 mostra as propriedades da cada meio filtrante fornecidas pelo fabricante. A Figura 4.7 mostra as imagens dos meios filtrantes obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) aumentadas 150 vezes.

Tabela 4.1. Propriedades dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus fornecidas pelo fabricante

Propriedades	RAD +	RAD Plus
Gramatura (g/cm^3)	150	120
Espessura (μm)	450	350
Diâmetro médio dos poros (μm)	46	31
Diâmetro máximo de poros (μm)	59	42
Corrugação (μm)	310	330
Teor de resina (%)	18	16

Figura 4.7. Imagem obtida de microscópio eletrônico de varredura da superfície de entrada do meio filtrante RAD + (a) e RAD Plus (b) aumentadas 150 vezes.



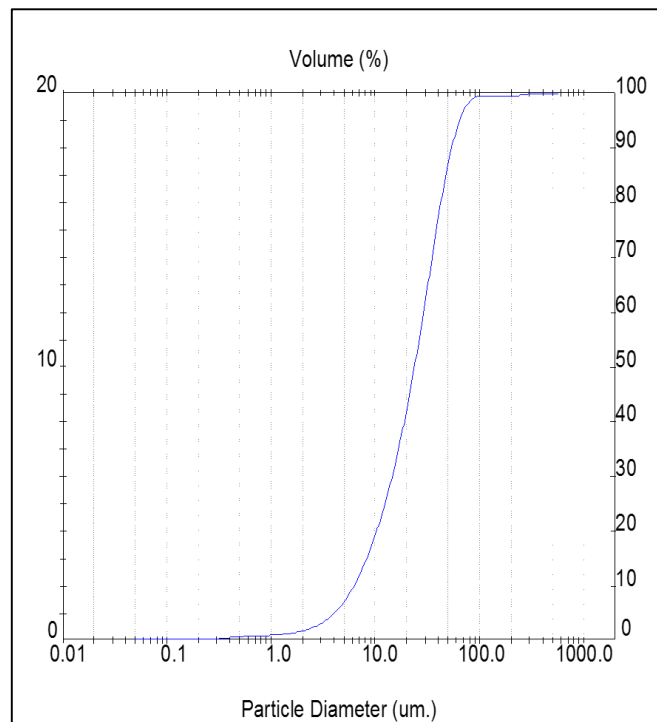
RAD +

RAD Plus

Fonte: ACERVO PESSOAL (2014).

O material particulado escolhido para os ensaios de filtração foi o talco puro do fabricante LabSynth Produtos para Laboratório LTDA. A escolha desse material deu-se pelas sua compatibilidade com o equipamento de filtração. Ou seja, por ser um material relativamente leve que poderia ser arrastado pela corrente gasosa no interior dos dutos, sem se depositar ao longo da tubulação horizontal. Sua densidade é de $2,804 \text{ g/cm}^3$, obtida por um picnômetro Micromeritics modelo Accupyc 1330 do departamento de Engenharia Química da UFSCar, seu diâmetro médio volumétrico é de $28,35 \text{ }\mu\text{m}$ e seu diâmetro médio de Stokes de $10,03 \text{ }\mu\text{m}$. Ambos os valores de diâmetro foram obtidos pelo equipamento Malvern MasterSizer MicroPlus (MAF 5001) também do departamento de Engenharia Química da UFSCar. A distribuição granulométrica do talco utilizado é mostrada na Figura 4.8, onde pode-se observar diâmetros do talco entre aproximadamente $0,1$ e $100 \text{ }\mu\text{m}$.

Figura 4.8. Distribuição granulométrica do talco obtida pelo equipamento Malvern MasterSizer MicroPlus.



Fonte: ACERVO PESSOAL (2014).

4.3. Metodologia dos ensaios

Para avaliar o desempenho dos meios filtrantes, foram realizados ensaios de permeabilidade e filtração, sendo analisadas a porosidade da torta de filtração e a quantidade de material particulado que transpõe cada meio filtrante. O gás utilizado para todos os ensaios foi o ar comprimido fornecido pelos compressores. Todos os ensaios foram feitos em triplicata e em alguns casos em que foi necessário duplicata, devido a quantidade de material disponível para os experimentos. Em seguida serão apresentados os procedimentos experimentais.

4.3.1. Ensaios para a determinação da permeabilidade

Os ensaios para a determinação da permeabilidade dos meios filtrantes foram realizados para as pressões absolutas do sistema de 93, 193, 293 393 e 493 kPa variando a vazão de gás entre 0 L/min e 80 L/min, o que equivale uma faixa de velocidade superficial do gás de 0 a 0,25 m/s, sem a injeção de material particulado. Os dados da queda de pressão foram adquiridos pelo sistema de aquisição. Com esses dados foi possível a construção de um gráfico

$\Delta P \times v_s$ e, através do método dos mínimos quadrados, ajustar os dados usando uma equação do tipo $y = ax + bx^2$. Este ajuste foi confrontado com a Equação 3.1, a fim de determinar as constantes k_1 e k_2 .

4.3.2. Ensaio de filtração

A partir dos ensaios de filtração foram determinadas as curvas de queda de pressão, a porosidade da torta de filtração e a quantidade de partículas que transpõe os meios filtrantes.

Para esses ensaios, é necessário injetar o material particulado no fluxo gasoso a uma velocidade pré-determinada. A velocidade superficial do gás também deve ser fixada, variando apenas a pressão absoluta do sistema. Foi estipulada uma queda de pressão máxima da torta de filtração, pois, devido à disposição horizontal do equipamento, tortas muito espessas não se sustentam e tendem a se destruir na retirada do meio filtrante. Sendo assim, estipulou-se uma vazão de 0,0004 g/s de talco, inserido por uma rosca sem fim controlada por um variador de velocidade ajustado a 80%, e uma queda de pressão máxima da torta de cerca de 700 Pa. Os ensaios foram realizados nas pressões absolutas do sistema de 93, 293 e 493 kPa, a fim de determinar a influência da pressão do sistema na filtração. Isso foi feito para velocidades superficiais de filtração de 5 e 6 cm/s, também a fim de determinar a influência da velocidade de filtração no processo. Os dados de tempo e queda de pressão foram registrados pelo sistema de aquisição de dados. A massa de material particulado foi determinada com o auxílio de uma balança analítica, pesando o meio filtrante antes e após o ensaio. Com isso, foram construídos gráficos $\Delta P \times W$.

4.3.3. Resistência específica e porosidade da torta de filtração

A partir dos ensaios de filtração, foram determinadas a resistência específica da torta, de acordo com a Equação 3.5, e a porosidade das tortas formadas pelo método indireto. Foram utilizadas neste cálculo as correlações de Ergun (Equação 3.6), de Rudnick-Happel (Equação 3.7), de MacDonald (Equação 3.8), e de Endo (Equação 3.9).

4.3.4. Penetração do material particulado nos meios filtrantes

Para determinar a quantidade de partículas que penetram o meio filtrante, o procedimento é praticamente o mesmo da filtração, sendo a única diferença o uso do contador de partículas Klotz, que foi disposto após o meio filtrante. Pelo fato de o equipamento possuir uma restrição em relação à concentração máxima de partículas, e este valor ser baixo, optou-se por mensurar a quantidade de partículas apenas após o meio filtrante para que o equipamento não fosse danificado. Assim, esse procedimento foi realizado afim apenas de comparar o desempenho dos meios RAD + e RAD Plus. As medições foram realizadas com os mesmos parâmetros dos ensaios de filtração. O contador mediu a quantidade de partículas após o meio filtrante durante 10 segundos. Foram realizadas 5 medições por ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados. Todos os gráficos mostrados apresentam as médias dos dados das réplicas ou tréplicas. Os desvios-padrão foram calculados e podem ser encontrados no Apêndice A desse trabalho junto com todos os dados obtidos experimentalmente.

5.1. Permeabilidade dos meios filtrantes

Os ensaios de permeabilidade dos meios filtrantes foram realizados para as pressões absolutas de 93 a 493 kPa variando a velocidade superficial do gás entre 0,00 e 0,25 m/s. Os testes foram feitos em triplicata para os dois meios filtrantes. A partir dos resultados obtidos, foram construídas curvas da queda de pressão dos meios filtrantes em função da velocidade superficial do gás, calculada de acordo com a Equação 3.2. As Figuras 5.1 e 5.2 mostram essas curvas para os meios RAD + e RAD Plus, respectivamente.

Figura 5.1. Ajuste polinomial da curva $\Delta P \times v$ para o meio filtrante RAD +.

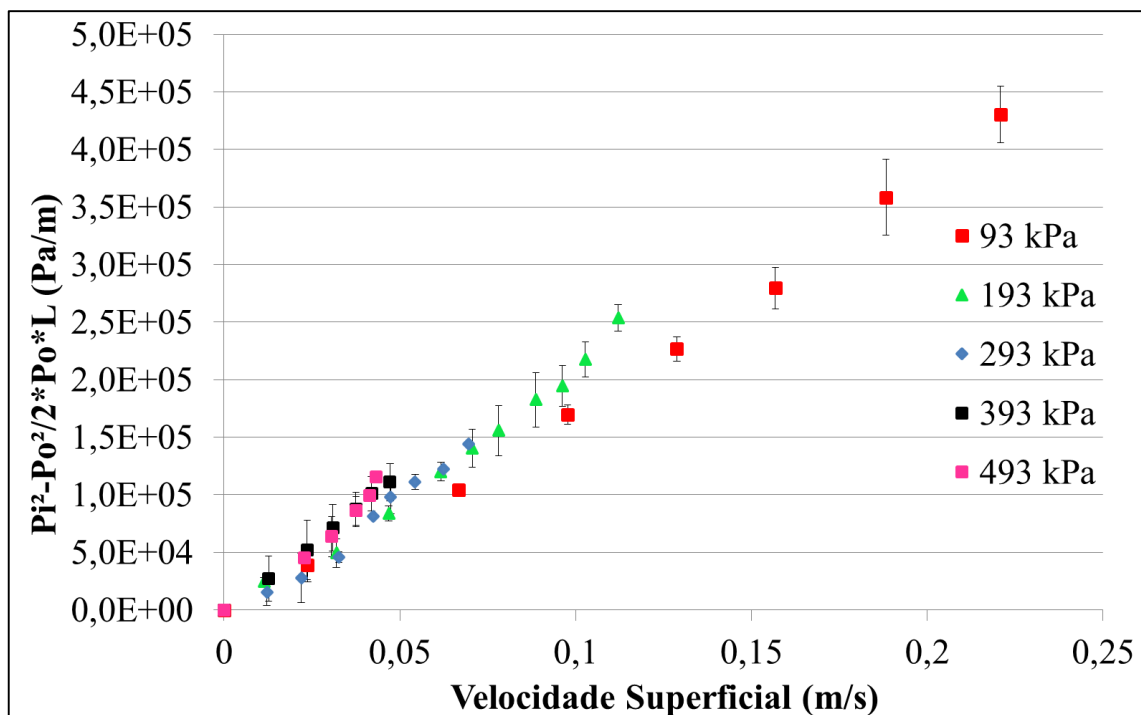
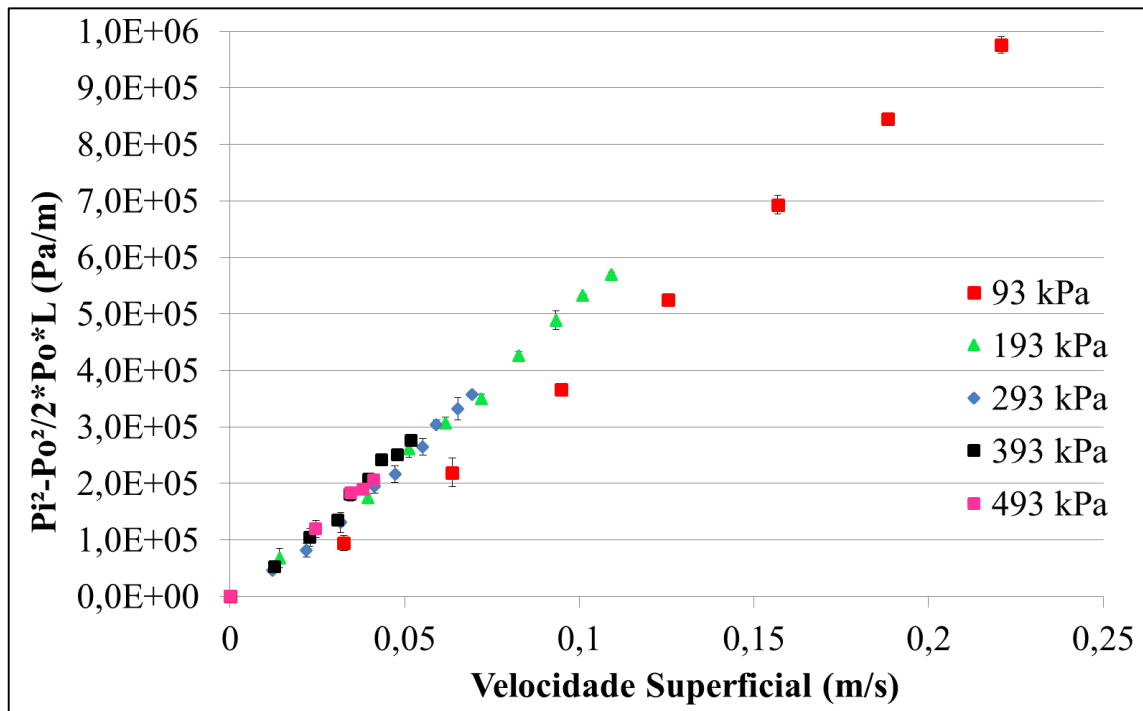


Figura 5.2. Ajuste polinomial da curva ΔP x vs para o meio filtrante RAD Plus.



É possível observar nas Figuras 5.1 e 5.2 que, para uma mesma velocidade superficial do gás, a queda de pressão aumenta à medida que a pressão do sistema aumenta, o que era esperado segundo trabalhos anteriores, como o de Tanabe (2011), por exemplo. Observa-se também um estreitamento das curvas a medida que a pressão do sistema aumenta, pois a velocidade superficial é corrigida de acordo com a Equação 3.2.

Uma justificativa plausível para a mudança da queda de pressão do sistema, é a mudança das propriedades do ar com a variação da pressão de trabalho, com a viscosidade tendo variações insignificantes e a densidade variando linearmente com a pressão. Isso afeta principalmente o termo inercial da Equação 3.1, já que este termo quadrático depende da densidade do gás. Outra justificativa para este comportamento são as propriedades intrínsecas das constantes k_1 e k_2 , pois estas são dependentes da compressão e deformação do meio filtrante (TANABE, 2011).

A partir das curvas de queda de pressão dos meios filtrantes em função da velocidade superficial do gás foi realizado um ajuste do tipo $y = ax^2 + bx$ e este foi confrontado com a Equação 3.1. Ou seja, y representa a queda de pressão e x representa a velocidade superficial. Com isso foi possível calcular o valor das constantes de permeabilidade k_1 e k_2 para os meios filtrantes. As Figuras 5.3 e 5.4 mostram os valores de k_1 e k_2 , respectivamente, para o RAD + e o RAD Plus.

Figura 5.3. Constante de permeabilidade k_1 para os meios filtrantes RAD + e RAD Plus.

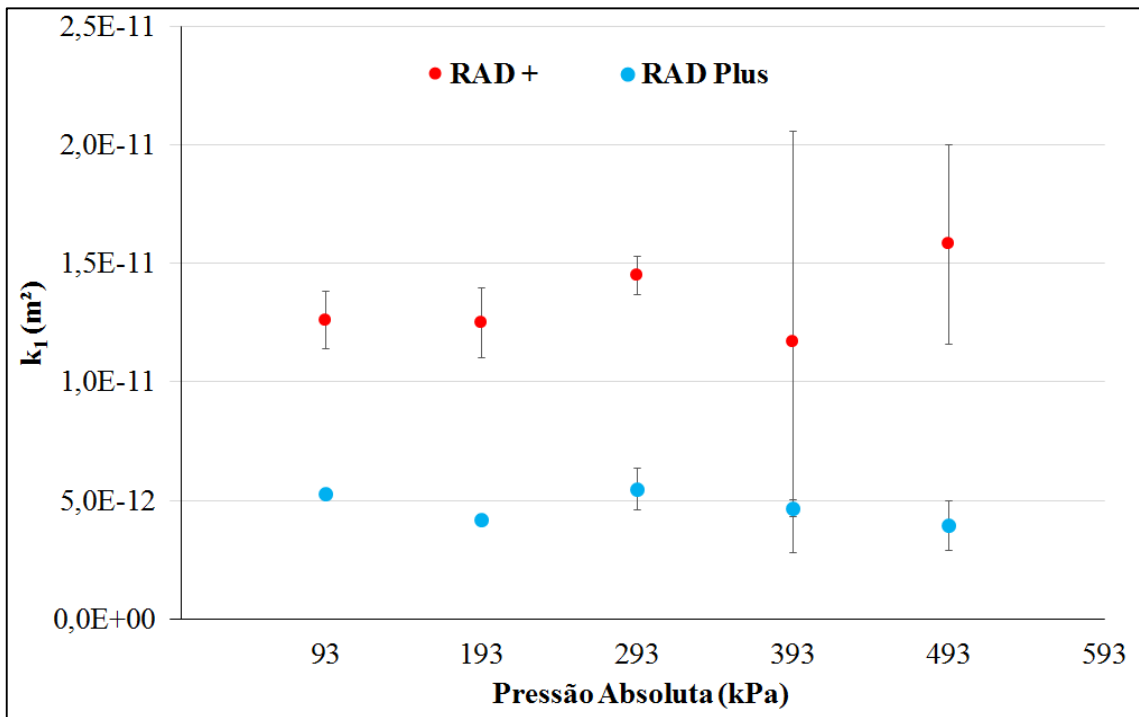
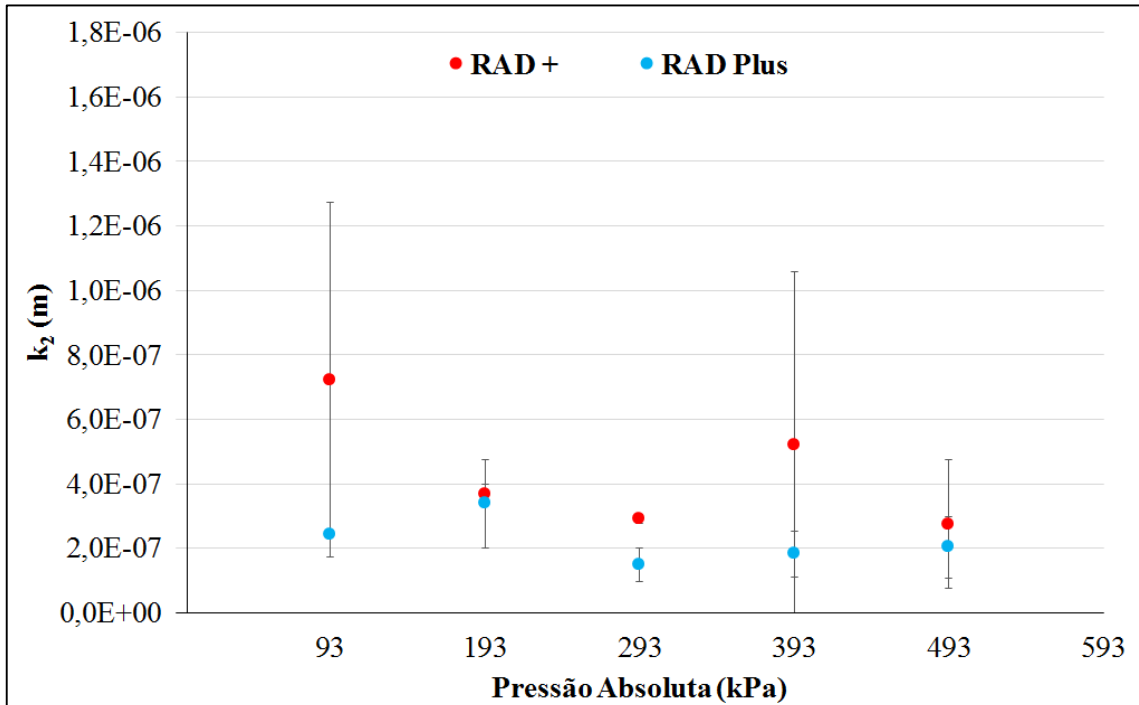


Figura 5.4. Constante de permeabilidade k_2 para os meios filtrantes RAD + e RAD Plus.



Pode-se notar nas Figuras 5.3 e 5.4 que as constantes k_1 e k_2 para os dois meios filtrantes não tiveram grande variação com a pressão. Dessa forma a constante k_1 , que aparece no termo viscoso da Equação 3.1, como a constante k_2 , pertencente ao termo inercial, podem

então ser consideradas constantes quanto à pressão. Apesar de as constantes k_2 para o RAD + e para o RAD Plus na pressão de 93 kPa parecerem apresentar disparidade, essa diferença é pequena, podendo ser explicada por algum possível erro experimental, pois o valor deste erro para este ponto, comparado aos outros pontos, foi grande.

A hipótese de que a queda de pressão aumentou com o aumento da pressão do sistema devido a dependência das constantes k_1 e k_2 com algumas propriedades intrínsecas pode ser descartada, já que esses valores foram considerados constantes. Portanto, pode-se considerar que os meios filtrantes não sofreram nenhum tipo de deformação.

Além disso, pode-se concluir que o meio filtrante RAD + é mais permeável que o RAD Plus, pois, além de possuir valores das constantes Darciana e não-Darciana maiores, devido a suas características físicas possui uma filtração interna mais significativa enquanto que o meio filtrante RAD Plus possui filtração superficial mais significativa. O meio filtrante mais poroso tem a capacidade de absorver mais partículas e o menos poroso retém a maior parte das partículas em sua superfície. Fato também observado por Osório (2006).

5.2. Ensaios de filtração

Os ensaios de filtração foram realizados para determinar as curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida nos filtros, a resistência específica das tortas formadas e a porosidade calculada das mesmas. Para esses ensaios foi adicionado o talco puro ao sistema a uma vazão de 0,0004 g/s por meio da rosca sem fim e do variador de velocidade ajustado no valor de 80%. Foram realizados para as pressões de 93, 293 e 493 kPa, com velocidades superficiais de filtração fixas de 5 e 6 cm/s. Os dados de queda de pressão e o tempo foram mensurados e registrados pelo sistema e software de aquisição de dados.

5.2.1. Queda de pressão em função da massa depositada no meio filtrante

Foram construídas curvas de queda de pressão dos meios filtrantes em função da massa retida pelos mesmos. Para obter o valor da massa retida pesou-se o meio filtrante antes e depois de cada ensaio por meio de uma balança analítica Shimazu AY 220 com quatro casas decimais. Optou-se pela construção das curvas utilizando a massa e não o tempo para que a comparação dos resultados fosse mais precisa, pois as filtrações nem sempre duraram o mesmo

período de tempo, mesmo para uma filtração com as mesmas condições de operação. Esses ensaios foram feitos em triplicata.

- **Filtração com velocidade superficial fixa de 5 cm/s**

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostradas as curvas de queda de pressão nos meios filtrantes RAD + e RAD Plus, respectivamente, em função da massa de pó retida, com velocidade superficial de filtração de 5 cm/s. É possível observar que para uma mesma massa de pó, a queda de pressão no meio filtrante é menor para uma maior pressão do sistema.

Comparando os meios filtrantes em cada pressão do sistema observou-se uma retenção de material particulado um pouco maior para o RAD Plus. Também foi observado um início de filtração igual para ambos os meios filtrantes com alteração a partir de uma certa massa em cada pressão, o que sugere uma influência na filtração apenas da torta de filtração e não do material filtrante, porém, este último influenciando em sua formação. Portanto, para uma mesma massa de pó o meio filtrante RAD + possuía maior queda de pressão após a formação da torta.

Figura 5.5. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD +.

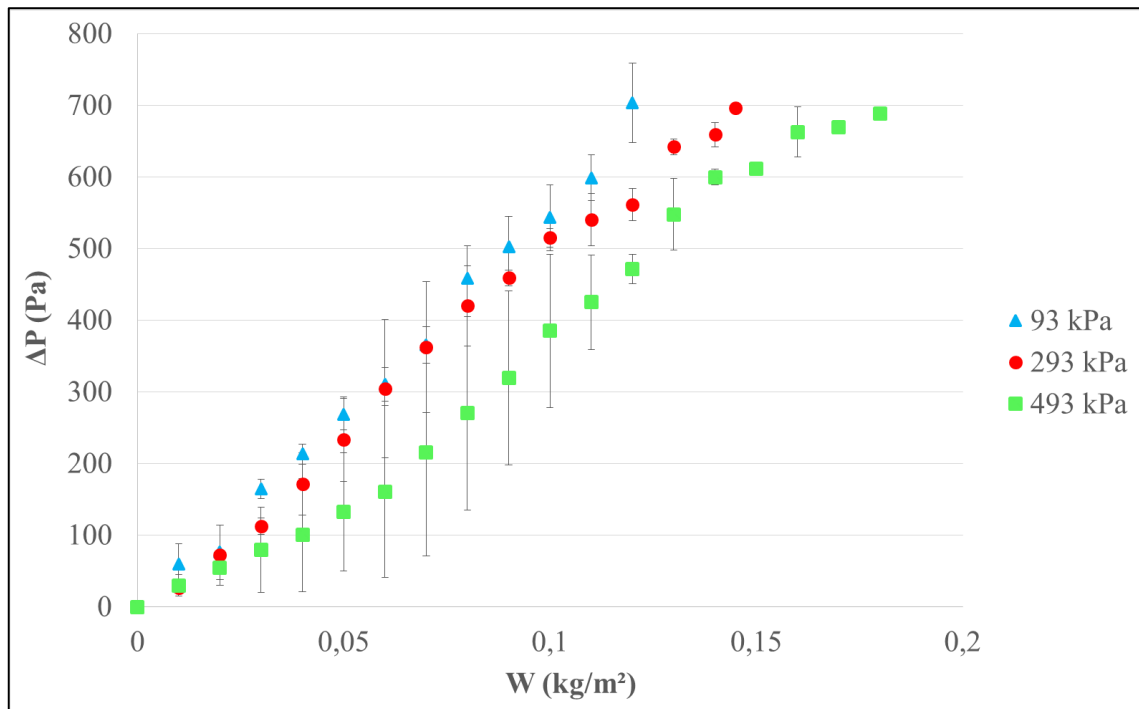
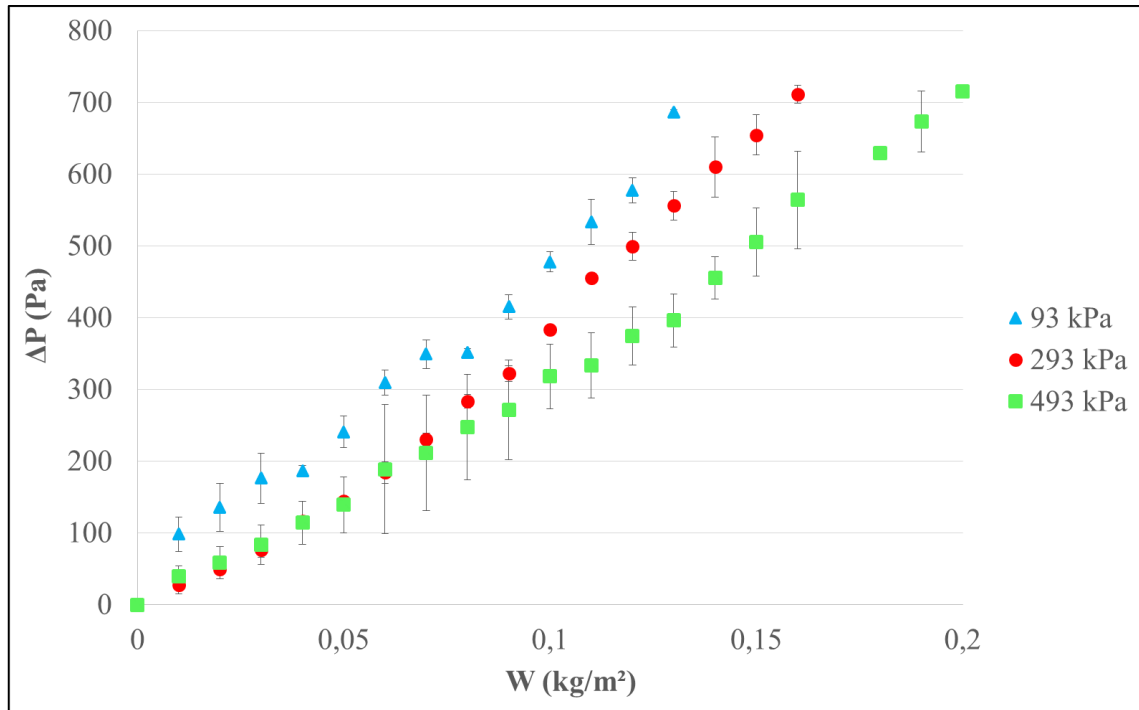


Figura 5.6. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD Plus.



Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 são apresentadas as comparações entre as curvas de queda de pressão dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus em função da massa de pó retida com velocidade superficial de filtração de 5 cm/s para as pressões de 93, 293 e 493 kPa, respectivamente.

Com a comparação entre os dois meios filtrantes, observou-se que o meio filtrante RAD Plus reteve maior quantidade de massa de partículas que o RAD + para uma mesma queda de pressão, como observado por Osório (2006) em seu trabalho. O meio filtrante RAD Plus reteve mais massa de partículas que o RAD + para todas as pressões estudadas. Por ser menos permeável, dificultando a penetração das partículas em seu interior, a filtração superficial é predominante, fazendo com que maior quantidade de partículas fosse coletada.

Figura 5.7. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 93 kPa com velocidade de filtração de 5 cm/s.

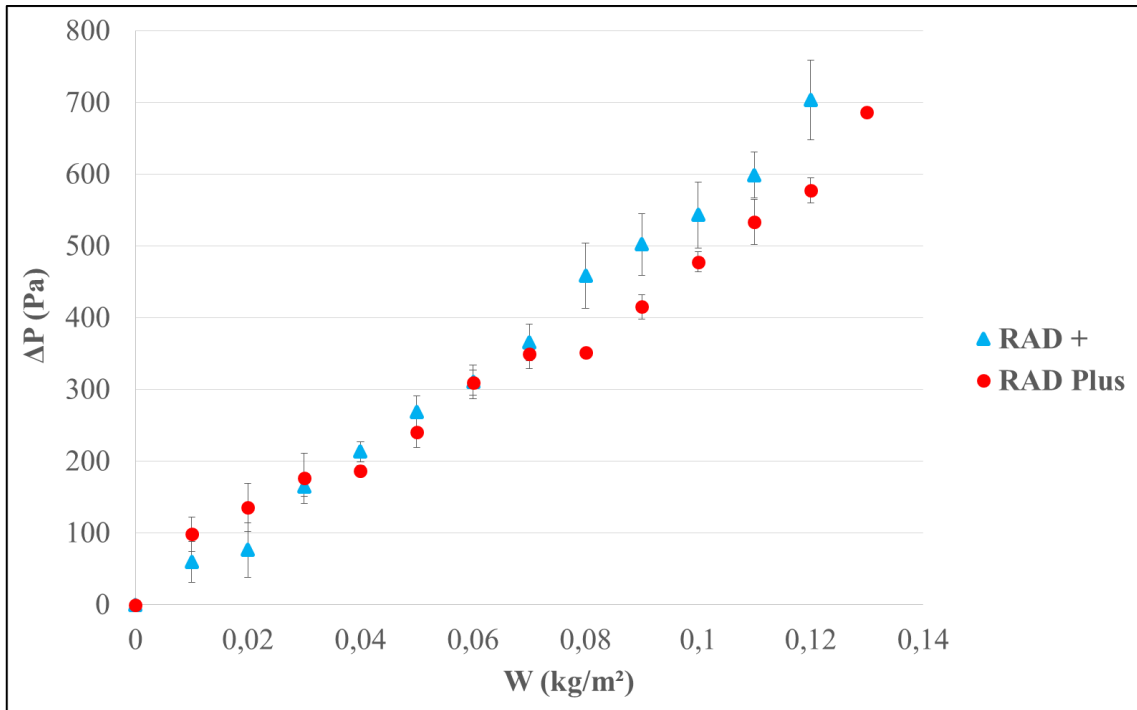


Figura 5.8. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 293 kPa com velocidade de filtração de 5 cm/s.

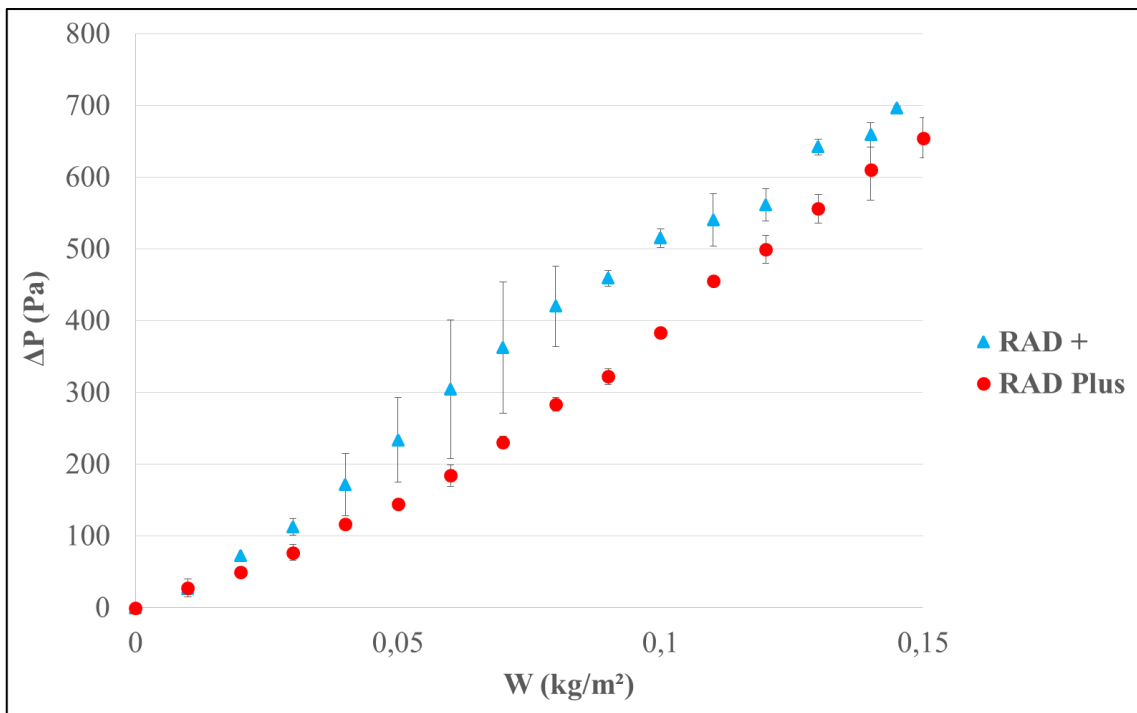
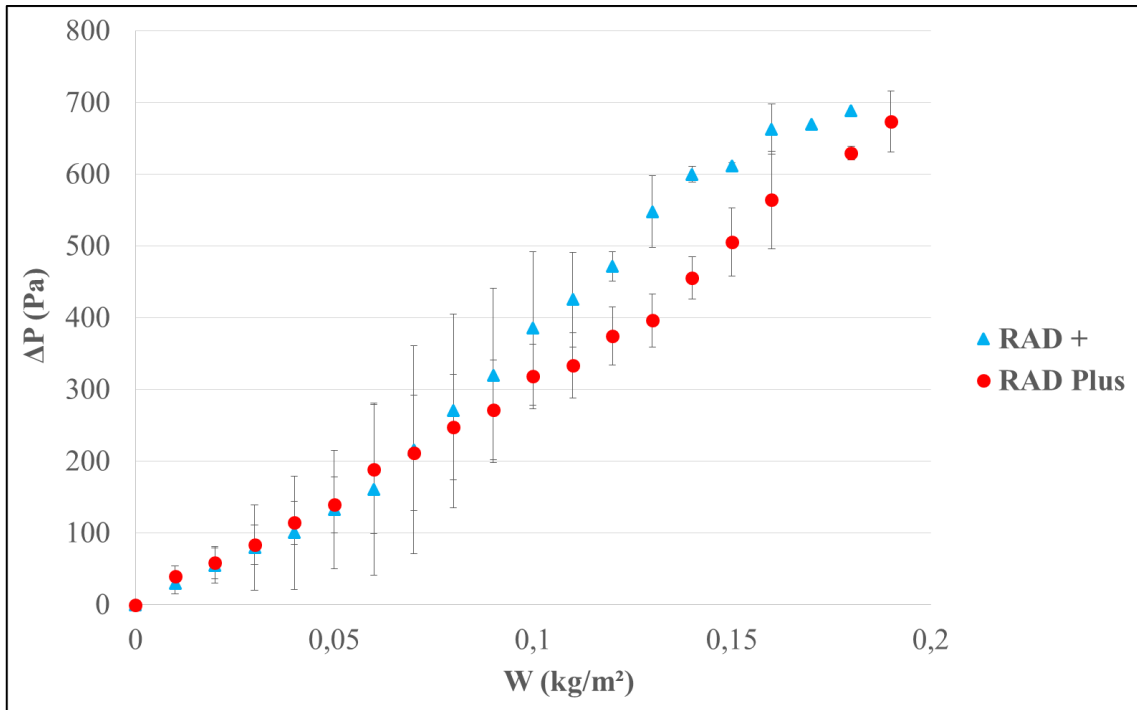


Figura 5.9. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 493 kPa com velocidade de filtração de 5 cm/s.



- **Filtração com velocidade superficial fixa de 6 cm/s**

As curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida com velocidade superficial de filtração de 6 cm/s para os meios RAD + e RAD Plus são apresentadas nas Figuras 5.10 e 5.11. Para essa velocidade de filtração foi observado o mesmo comportamento visto para a velocidade de filtração de 5 cm/s. Ou seja, para uma mesma massa de pó, a queda de pressão no meio filtrante é menor para uma maior pressão do sistema.

Quando comparados os meios filtrantes em cada pressão de trabalho, foi observado uma maior retenção de material particulado para o RAD Plus para as pressões de 293 e 493 kPa, não havendo distinção para a pressão de 93 kPa. Assim como os ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s, foi observado um início de filtração igual para os dois meios filtrantes, com alteração a partir de uma certa massa para as pressões de 293 e 493 kPa. Isto também sugere uma influência na filtração apenas da torta de filtração e não do material filtrante. Portanto, o meio filtrante RAD + possui maior queda de pressão para uma mesma quantidade de massa retida após a formação da torta.

Figura 5.10. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD +.

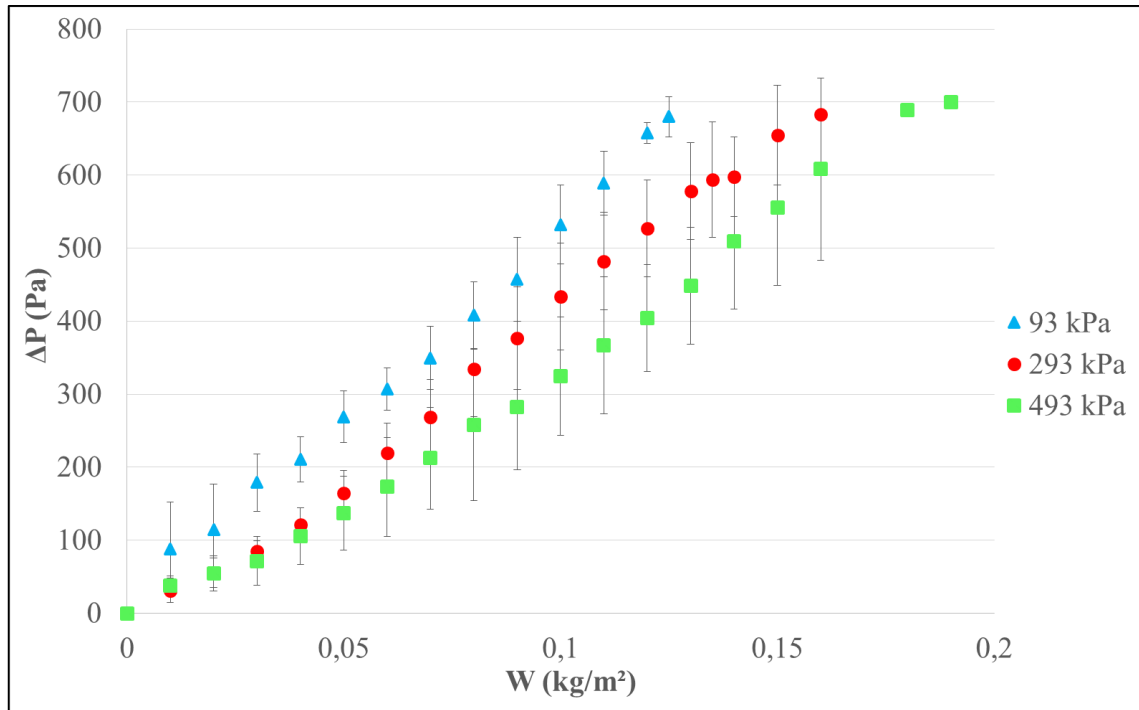
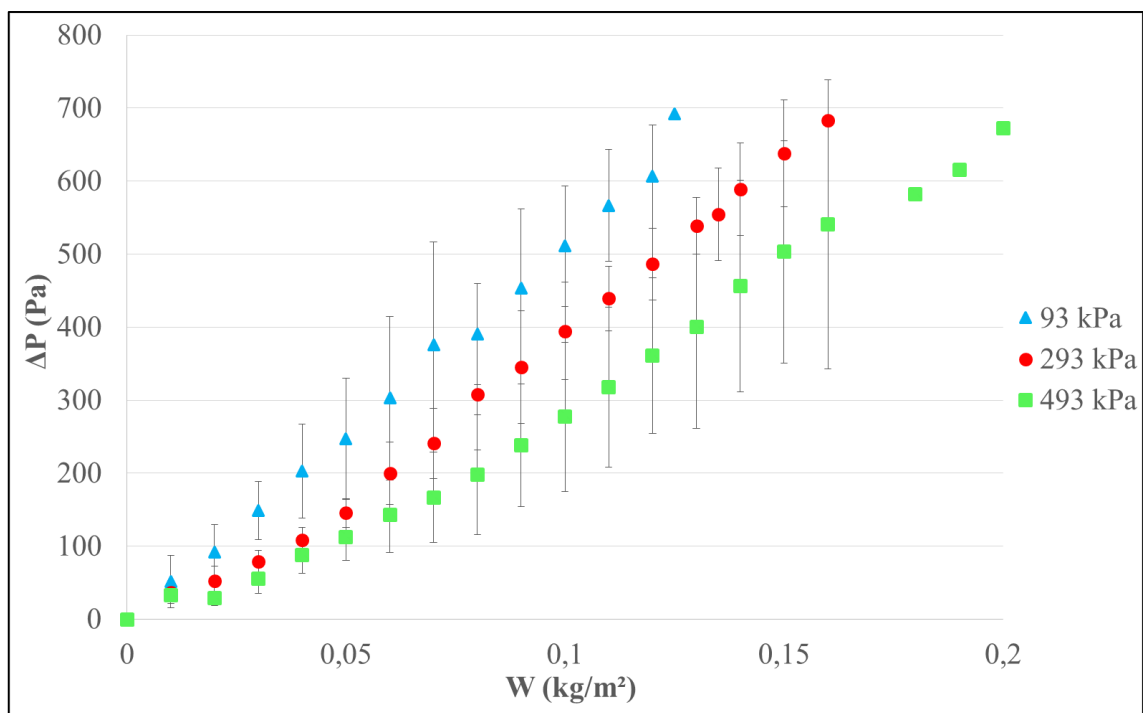


Figura 5.11. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para o meio filtrante RAD Plus.



Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 são mostradas as curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida com velocidade superficial de filtração de 6 cm/s para as pressões de 93, 293 e 493 kPa, respectivamente.

Assim como para os ensaios com velocidade de 5 cm/s observou-se que na maioria dos casos o meio filtrante RAD Plus reteve maior quantidade de massa de partículas que o RAD + para uma mesma queda de pressão, como observado por Osório (2006). O meio filtrante RAD Plus reteve mais massa de partículas que o RAD + para as pressões de 293 kPa e 493 kPa. Para a pressão de 93 kPa a massa coletada foi praticamente a mesma para os dois meios filtrantes.

Observa-se um começo de filtração idêntico em todos os casos, sendo os dados das filtrações na pressão de 93 kPa muito parecidos. Na pressão de 293 kPa uma maior retenção de material particulado para uma mesma queda de pressão foi observado com a velocidade de filtração de 6 cm/s. Já na pressão de 493 kPa houve paridade dos resultados no início e no término das filtrações, porém alguns pontos diferentes foram observados, ocorrendo maior retenção de massa também para a velocidade de 6 cm/s.

Figura 5.12. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 93 kPa com velocidade de filtração de 6 cm/s.

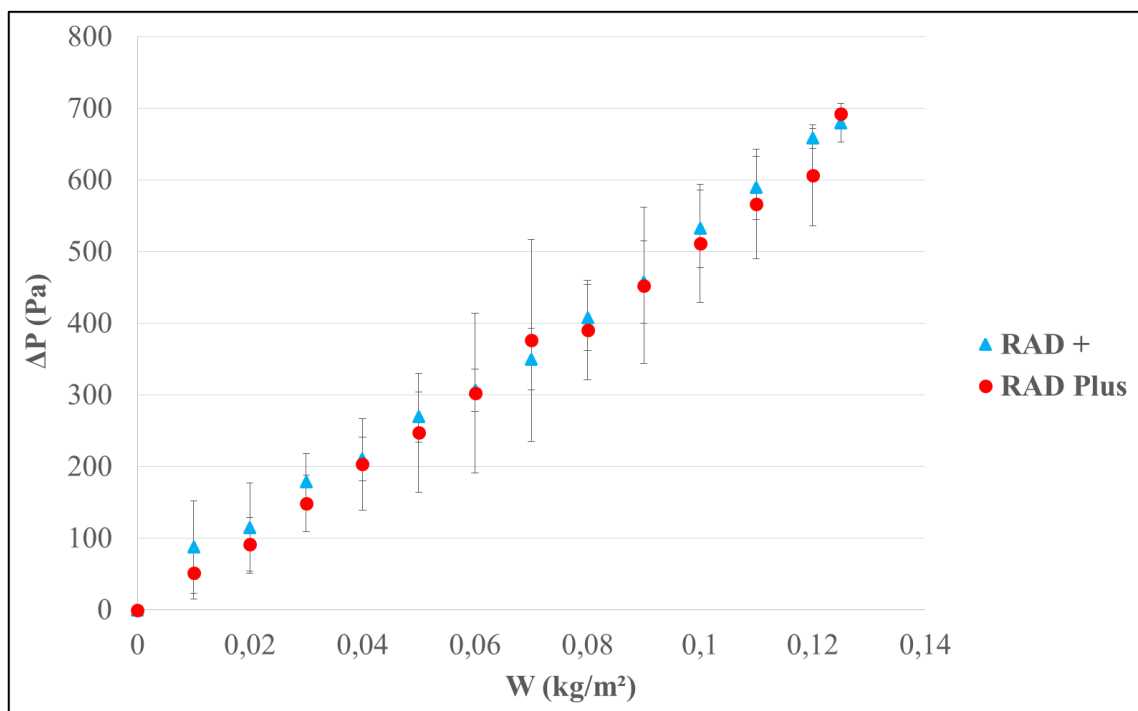


Figura 5.13. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 293 kPa com velocidade de filtração de 6 cm/s.

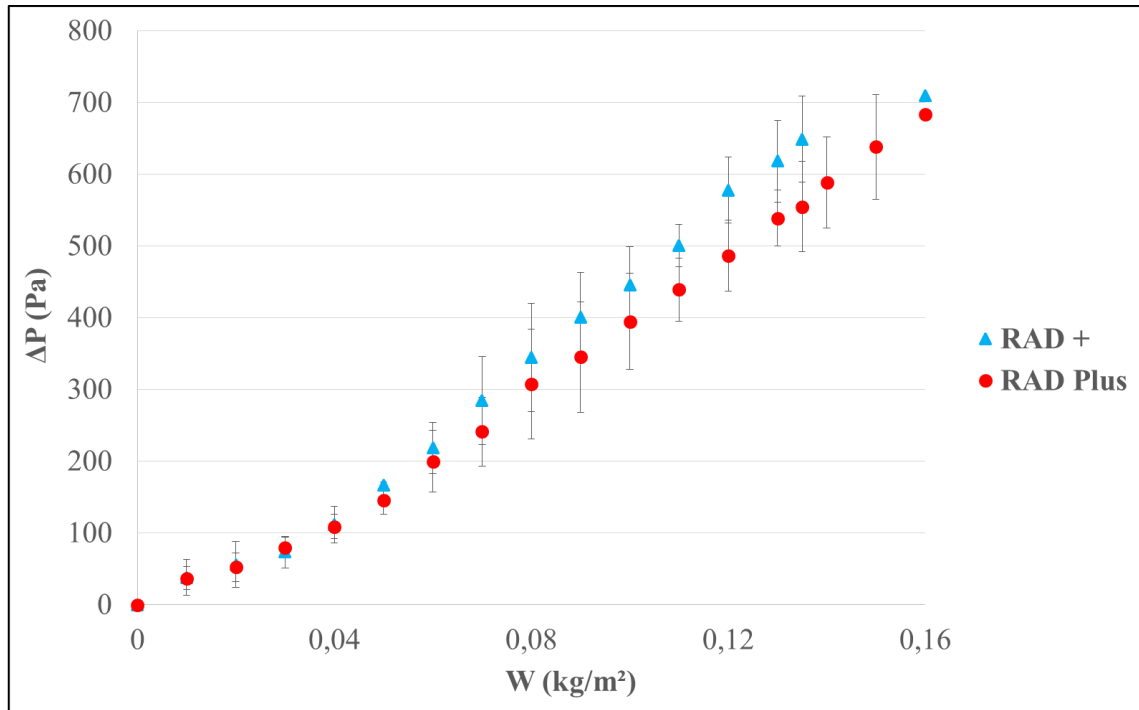
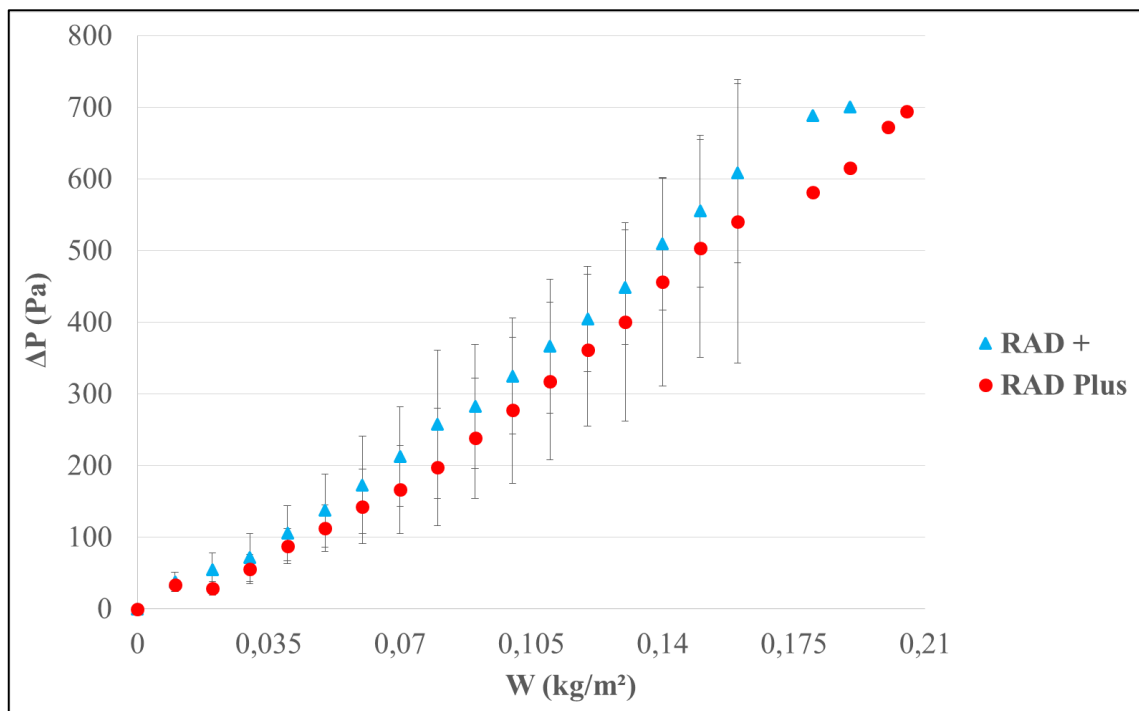


Figura 5.14. Curvas de queda de pressão em função da massa de pó retida para a pressão de 493 kPa com velocidade de filtração de 6 cm/s.



- **Comparação entre as velocidades de filtração de 5 cm/s e 6 cm/s**

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são apresentadas as comparações entre as curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida no meio RAD + para as pressões de 93 kPa, 293 kPa e 493 kPa, a velocidades superficiais de filtração de 5 e 6 cm/s.

Nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 são mostradas as curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida no meio filtrante RAD Plus para as pressões de 93, 293 e 493 kPa, respectivamente.

Observa-se um começo de filtração muito parecido em todos os casos. Na pressão de 293 kPa observou-se uma maior retenção de material particulado para uma mesma queda de pressão para a velocidade de filtração de 6 cm/s, no entanto esta diferença foi pequena.

Em todos os casos, os desvio-padrão das medidas praticamente se sobrepõe, indicando que a variação da velocidade superficial de filtração de 5 para 6 cm/s não foi suficiente para causar uma alteração significativa nos resultados.

Figura 5.15. Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD + para as pressão de 93 kPa.

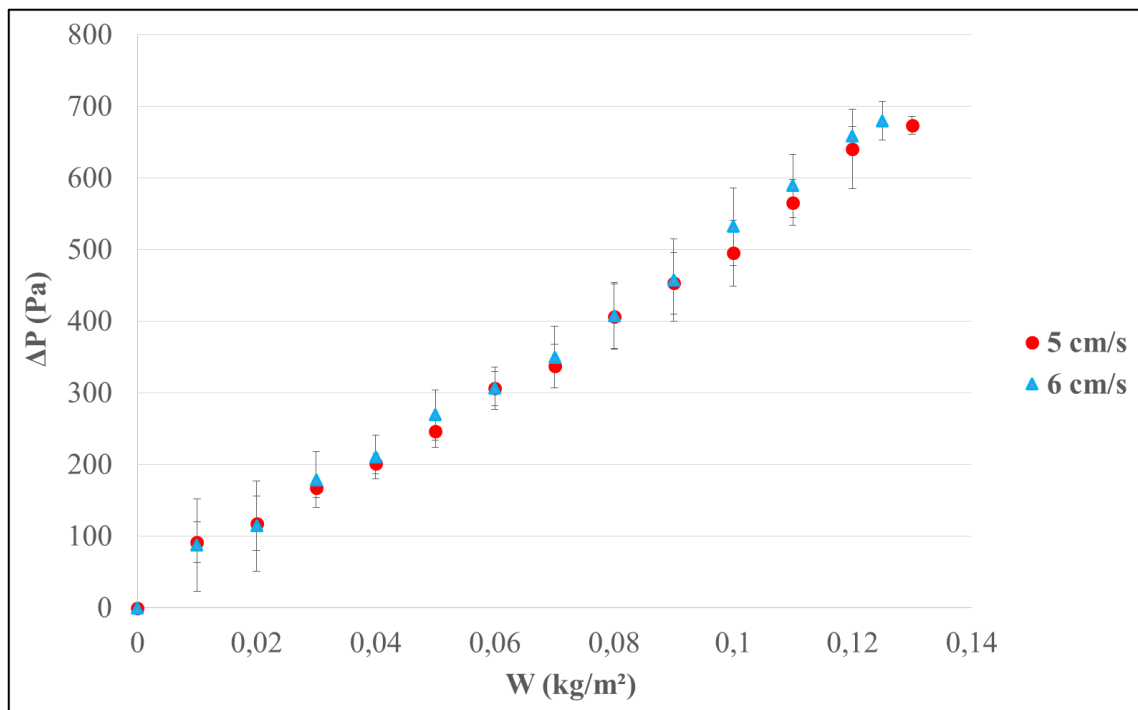


Figura 5.16. Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD + para as pressão de 293 kPa.

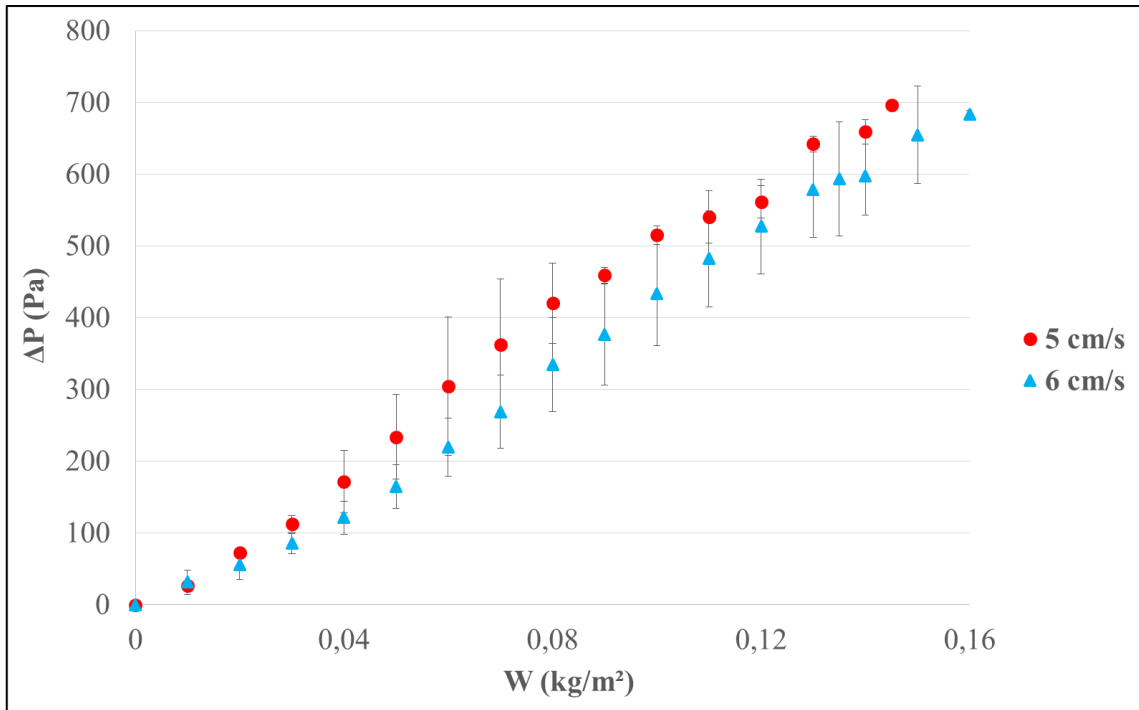


Figura 5.17. Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD + para as pressão de 493 kPa.

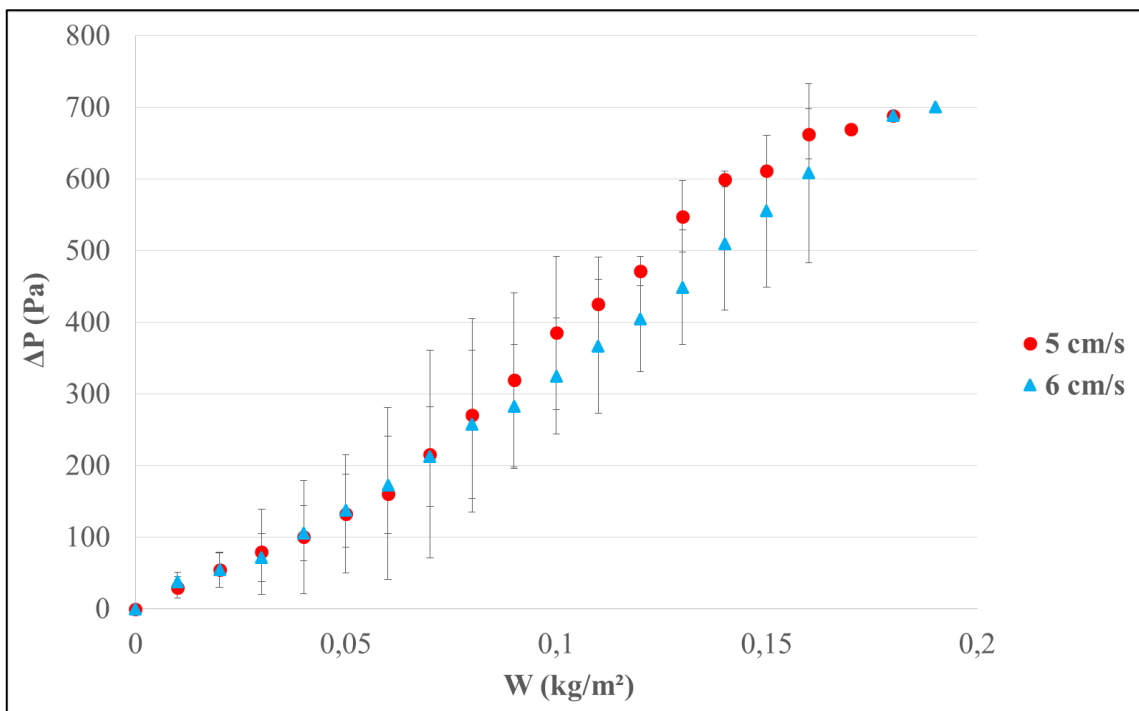


Figura 5.18. Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD Plus para as pressão de 93 kPa.

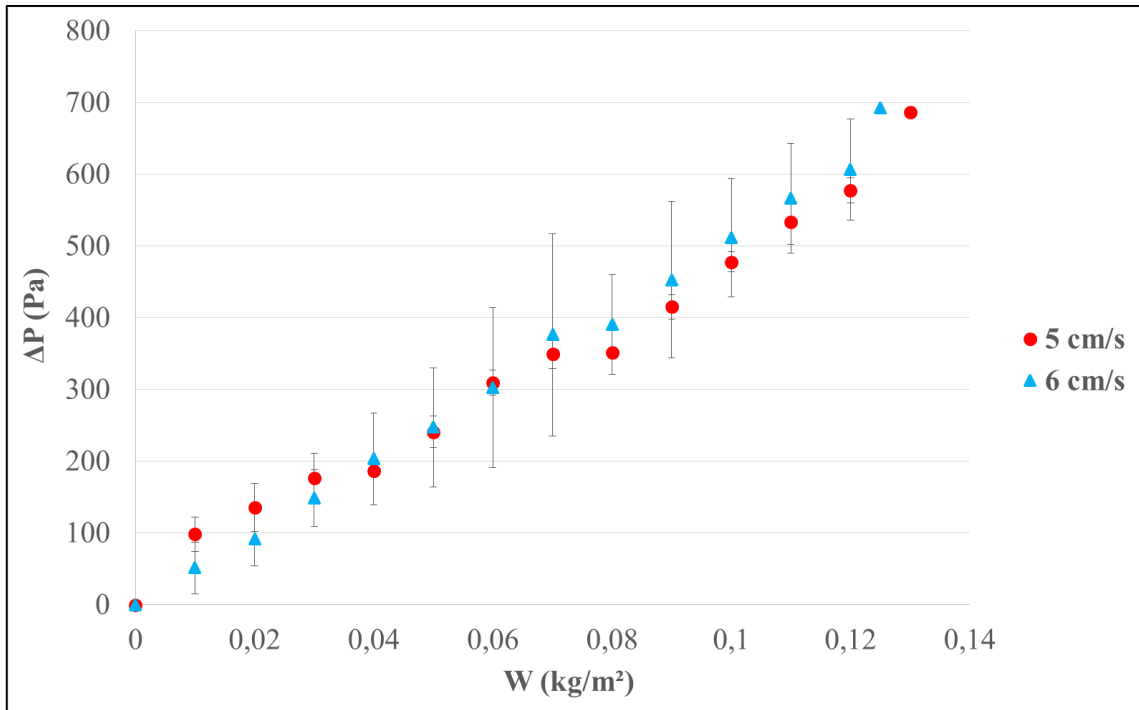


Figura 5.19. Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD Plus para as pressão de 293 kPa.

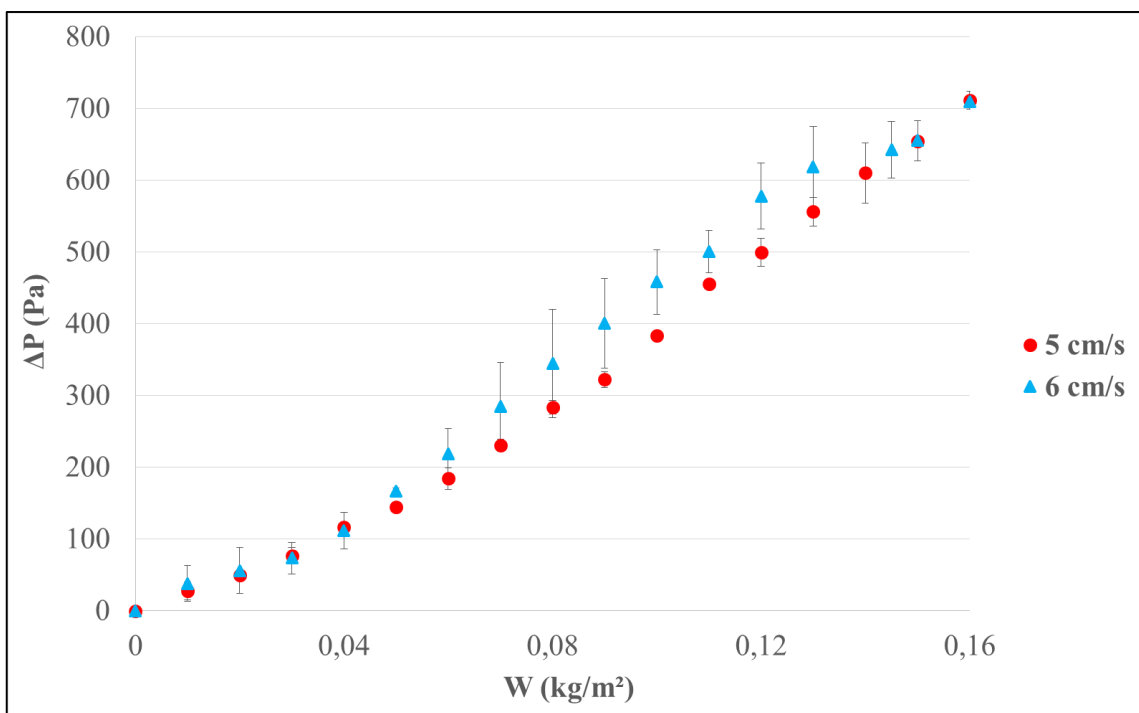
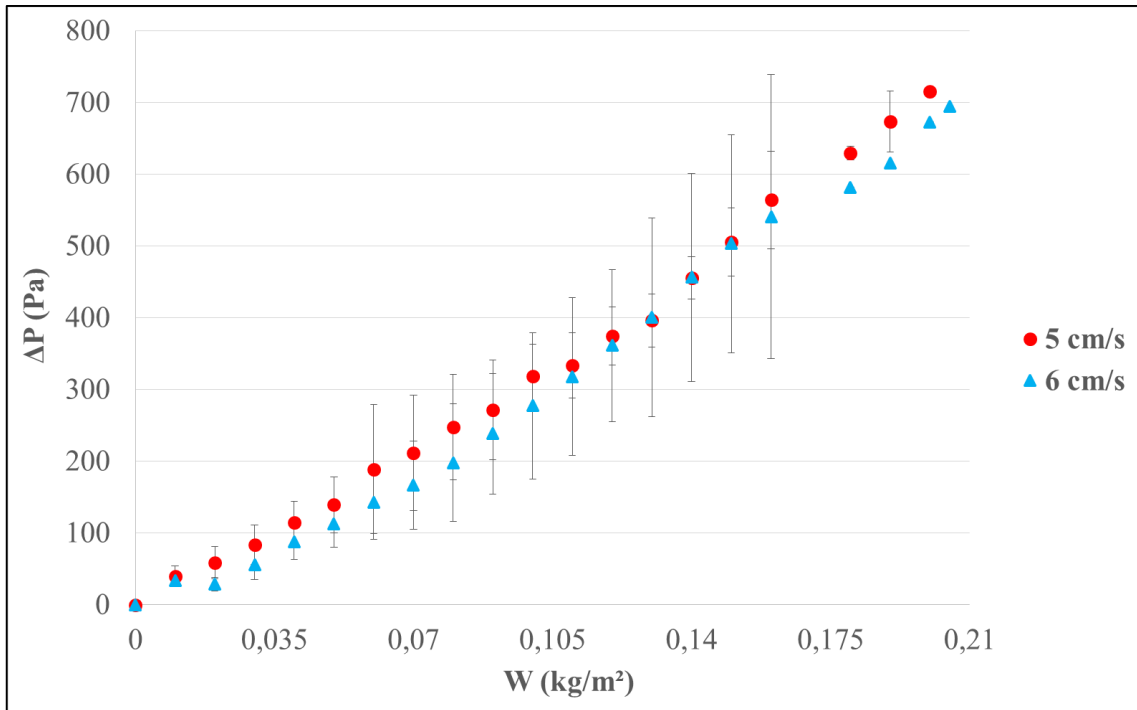


Figura 5.20. Curvas de queda de pressão do meio filtrante em função da massa de pó retida do meio filtrante RAD Plus para as pressão de 493 kPa.



5.2.2. Resistência específica da torta

A partir dos dados de queda de pressão registrados nos ensaios de filtração, da velocidade superficial de filtração e da massa de pó retida nos meios filtrantes, foi possível determinar a resistência específica das tortas formadas. Foi utilizada a Equação 3.4 e realizado um ajuste do tipo $y = ax$, sendo o coeficiente angular o valor da resistência específica. As Figuras 5.21 e 5.22 mostram os valores da resistência específica em função da pressão absoluta do sistema para os meios filtrantes RAD + e RAD Plus, respectivamente.

Os resultados encontrados foram os esperados, pois ocorre um decréscimo da resistência da torta a medida que a pressão aumenta. A resistência das tortas diminui, pois o aumento da pressão do sistema proporciona um aumento de caminhos preferenciais do fluido, já que ocorre mudança em suas propriedades. Foi observado também uma resistência de torta menor para a velocidade de filtração de 6 cm/s se comparada com a velocidade de 5 cm/s.

Figura 5.21. Resistência específica das tortas de filtração utilizando o meio filtrante RAD +.

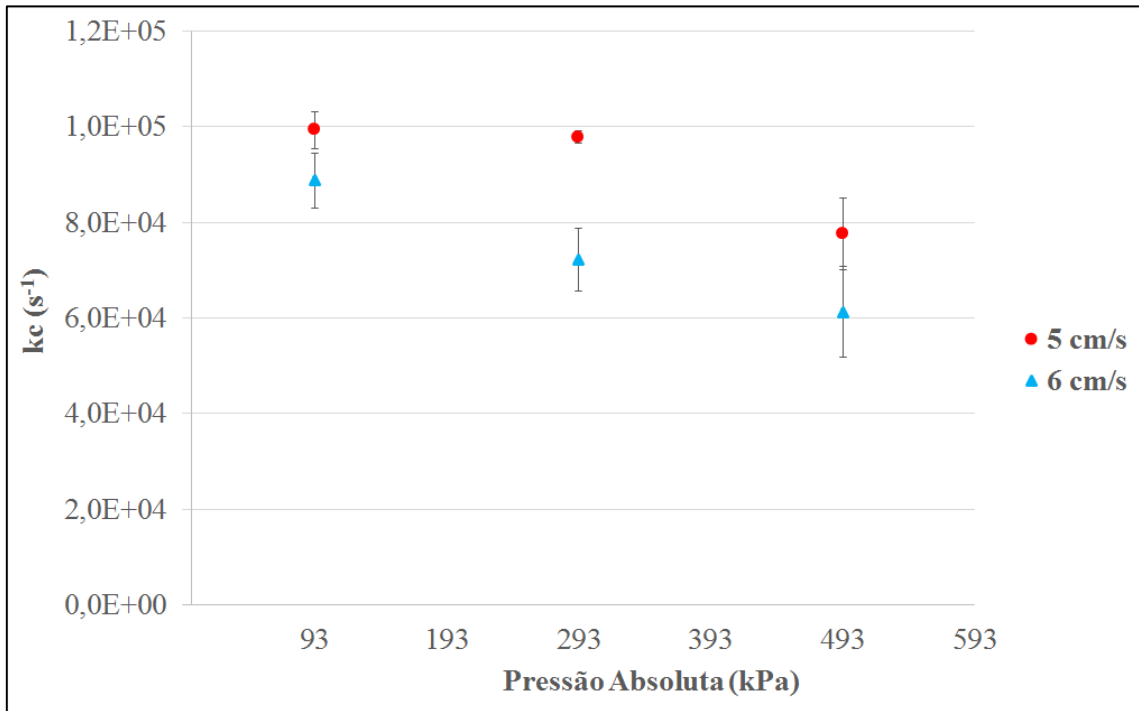
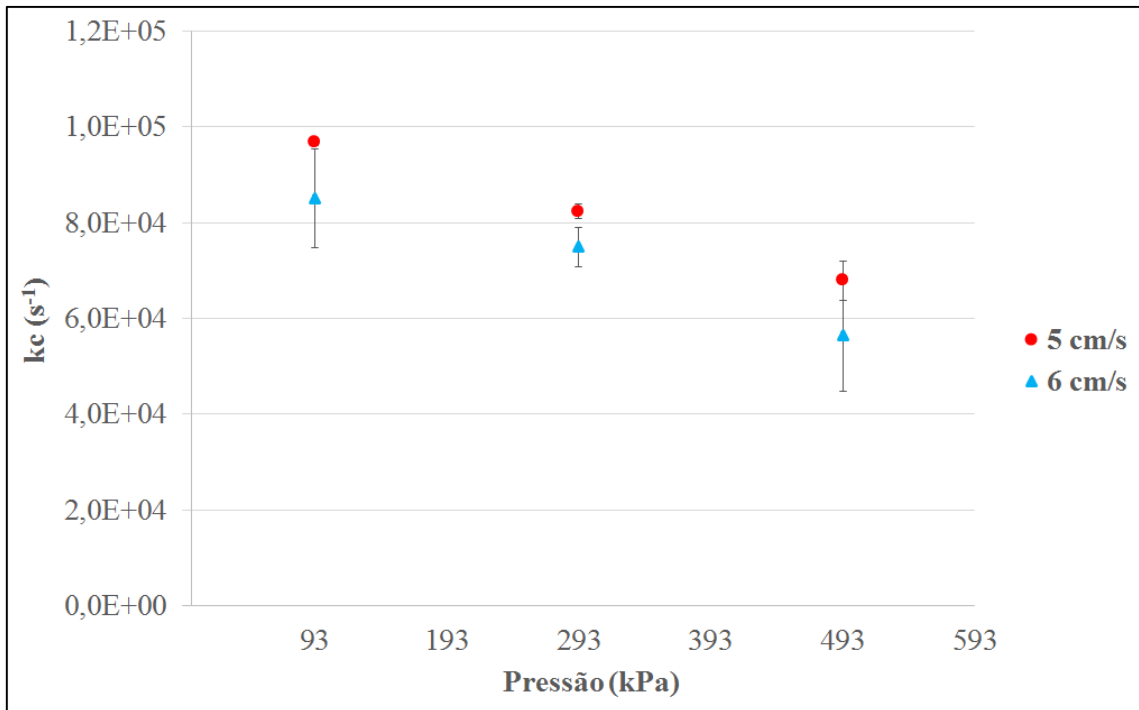


Figura 5.22. Resistência específica das tortas de filtração utilizando o meio filtrante RAD Plus.



A comparação da resistência específica da torta de filtração entre os meios filtrantes pode ser observada na Figura 5.23 para a velocidade de filtração de 5 cm/s, e na Figura 5.24, para a velocidade de 6 cm/s.

Figura 5.23. Resistência específica das tortas para a velocidade de filtração de 5 cm/s.

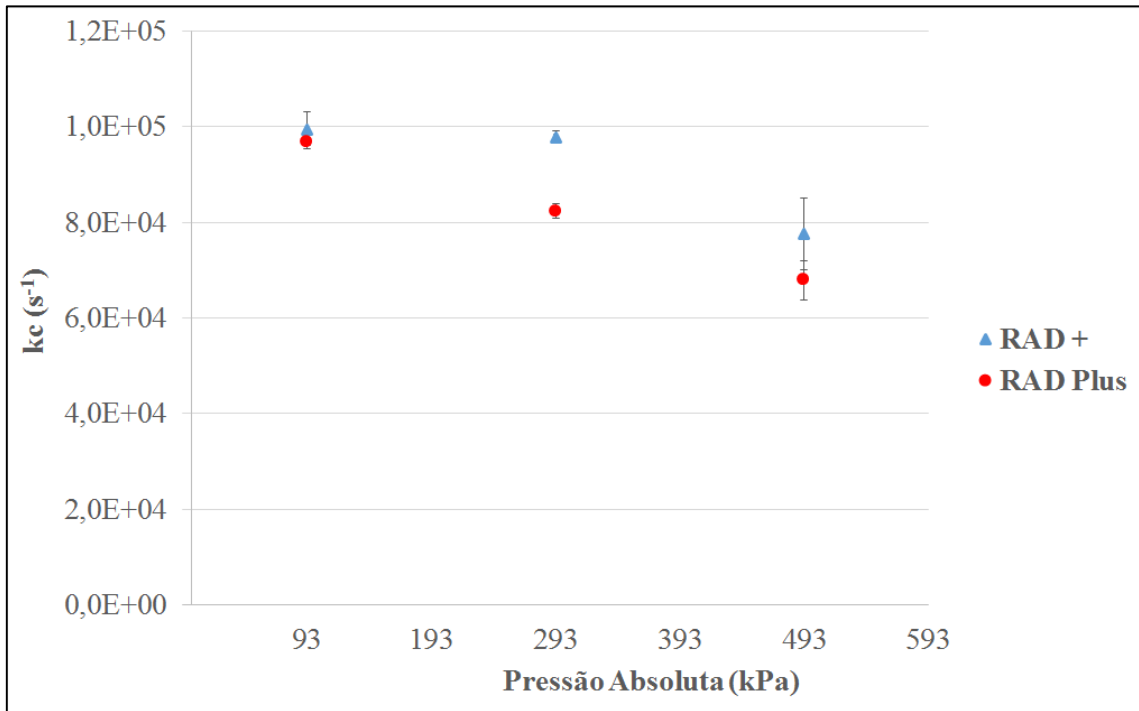
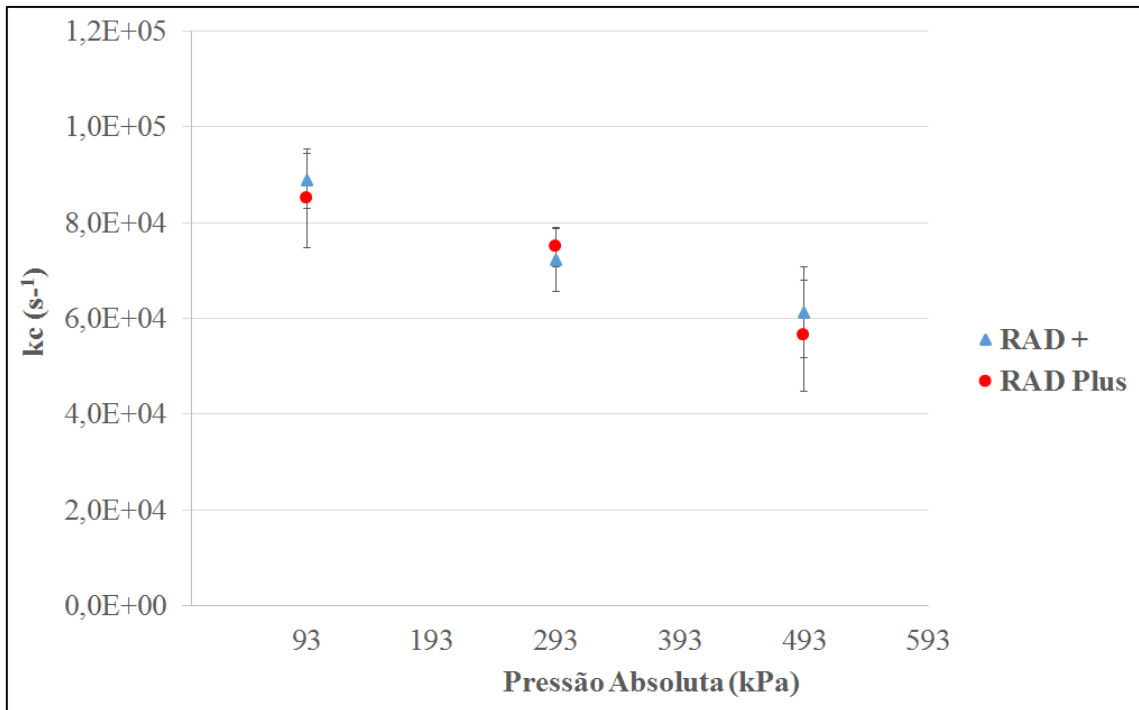


Figura 5.24. Resistência específica das tortas para a velocidade de filtração de 6 cm/s.



Foi observada uma resistência específica ligeiramente menor para o meio filtrante RAD Plus para a velocidade de filtração de 5 cm/s. Para a velocidade de 6 cm/s a resistência específica das tortas formada nos dois meios filtrante foi praticamente idêntica. Essa

menor resistência pode ser explicada pelo fato de a torta ser formada predominantemente pela filtração superficial, devendo haver mais espaços vazios na interface meio filtrante – torta de filtração.

5.2.3. Porosidade da torta de filtração

A porosidade foi determinada segundo alguns métodos encontrados na literatura. Foram escolhidos a correlação clássica de Ergun, a correlação de Rudnick-Happel, a correlação de MacDonald e a correlação de Endo. Nas Figuras 5.25 e 5.26 são mostrados os valores da porosidade calculada em função da pressão absoluta do sistema para o meio filtrante RAD + para as velocidades de 5 cm/s e 6 cm/s, respectivamente.

Os resultados encontrados foram os esperados, pois ocorre um acréscimo da porosidade a medida que a pressão aumenta, provocando assim uma redução da resistência ao escoamento do ar e diminuição da queda de pressão durante os ensaios de filtração. Uma possível justificativa para esse comportamento pode ser a influência da formação da torta ocasionada pelo tamanho das partículas que sedimentam com a variação da pressão no meio filtrante.

Figura 5.25. Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 5 cm/s utilizando o meio filtrante RAD +.

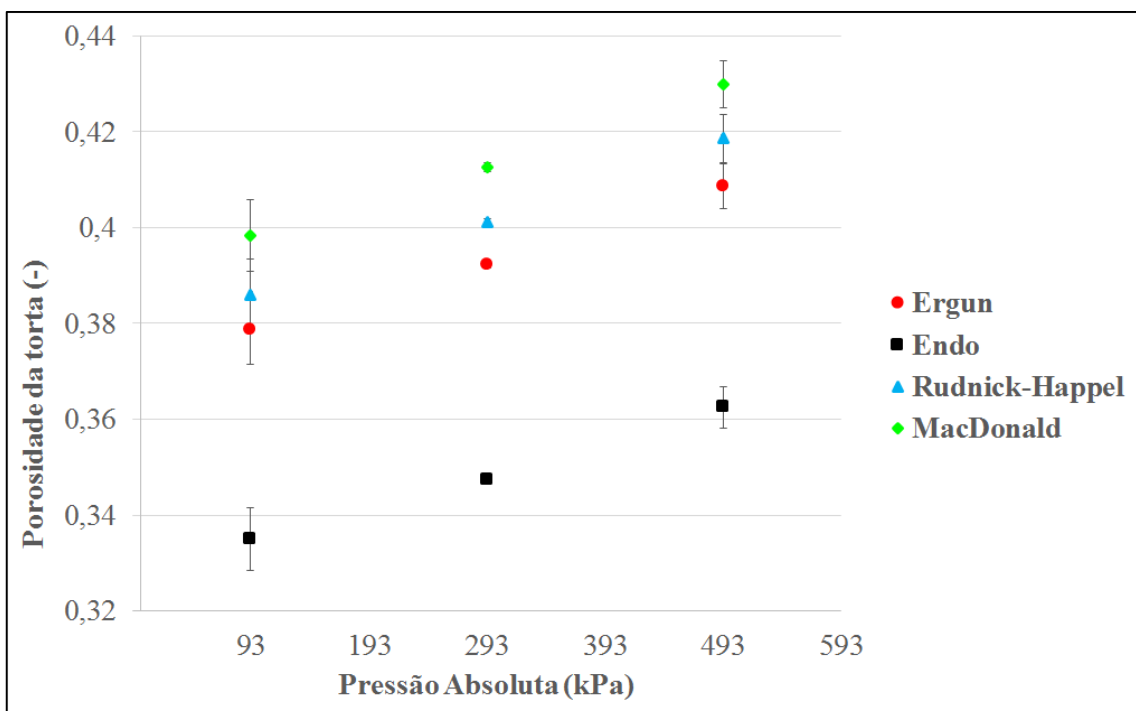
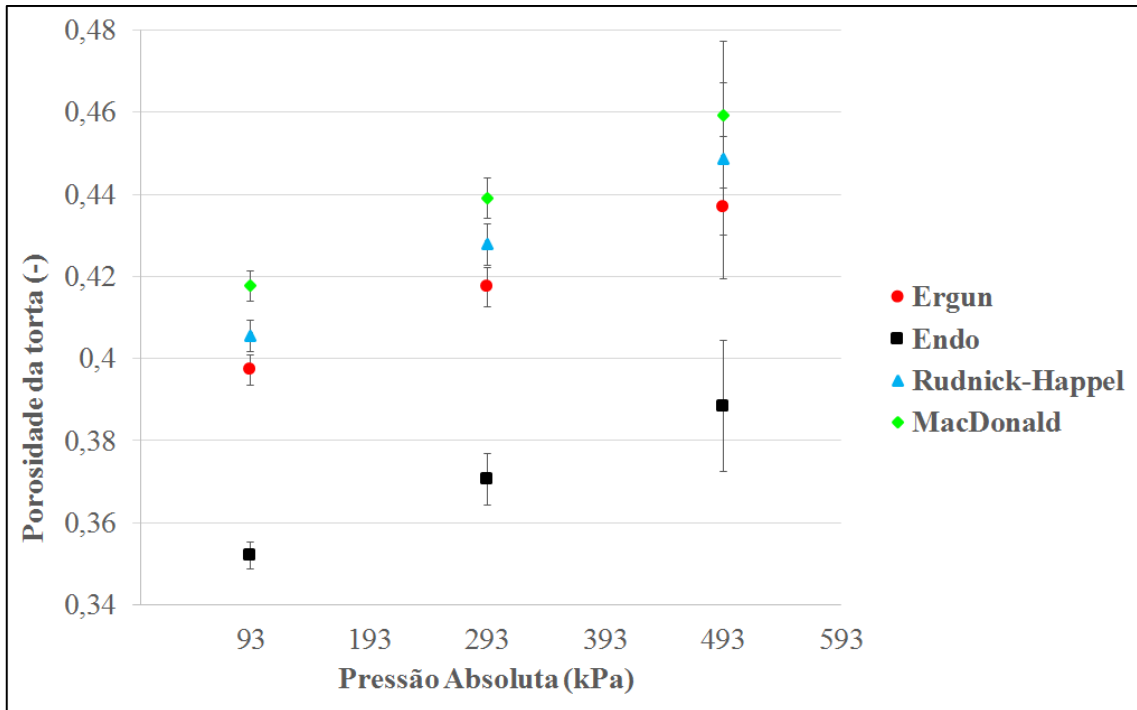


Figura 5.26. Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 6 cm/s utilizando o meio filtrante RAD +.



Nas Figuras 5.27 e 5.28 são apresentados os valores da porosidade calculada em função da pressão absoluta do sistema para o meio filtrante RAD Plus para as velocidades de 5 cm/s e 6 cm/s, respectivamente.

O mesmo comportamento encontrado para o meio filtrante RAD + ocorreu para o meio filtrante RAD Plus. Nota-se valores semelhantes para as correlações de Ergun, MacDonald e Rudnick-Happel, e valores mais distantes da correlação de Endo, comportamento semelhante observado por Fagnoli (2010) em seu trabalho. Vale ressaltar que Tanabe (2011) observou para o meio filtrante de celulose valores experimentais de porosidade das tortas de filtração mais próximos dos valores calculados com a correlação de Rudnick-Happel e Castro (2012) observou desvios inferiores a 10% dos valores obtidos diretamente e indiretamente pela correlação de Ergun.

Figura 5.27. Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 5 cm/s utilizando o meio filtrante RAD Plus.

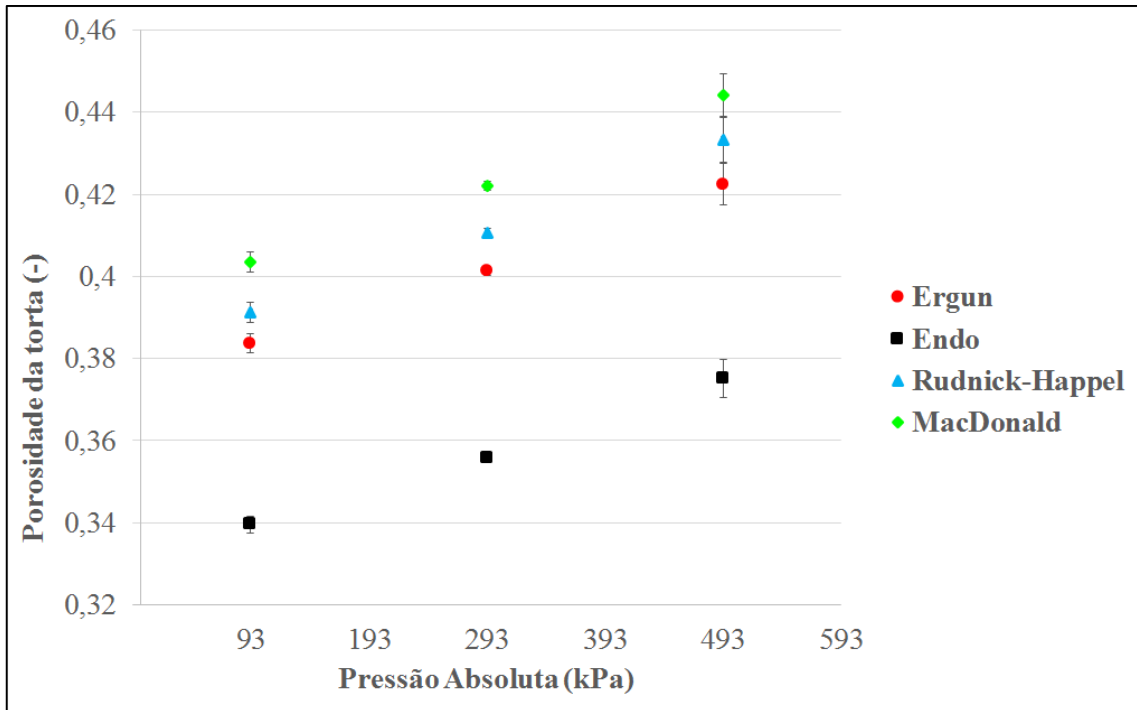
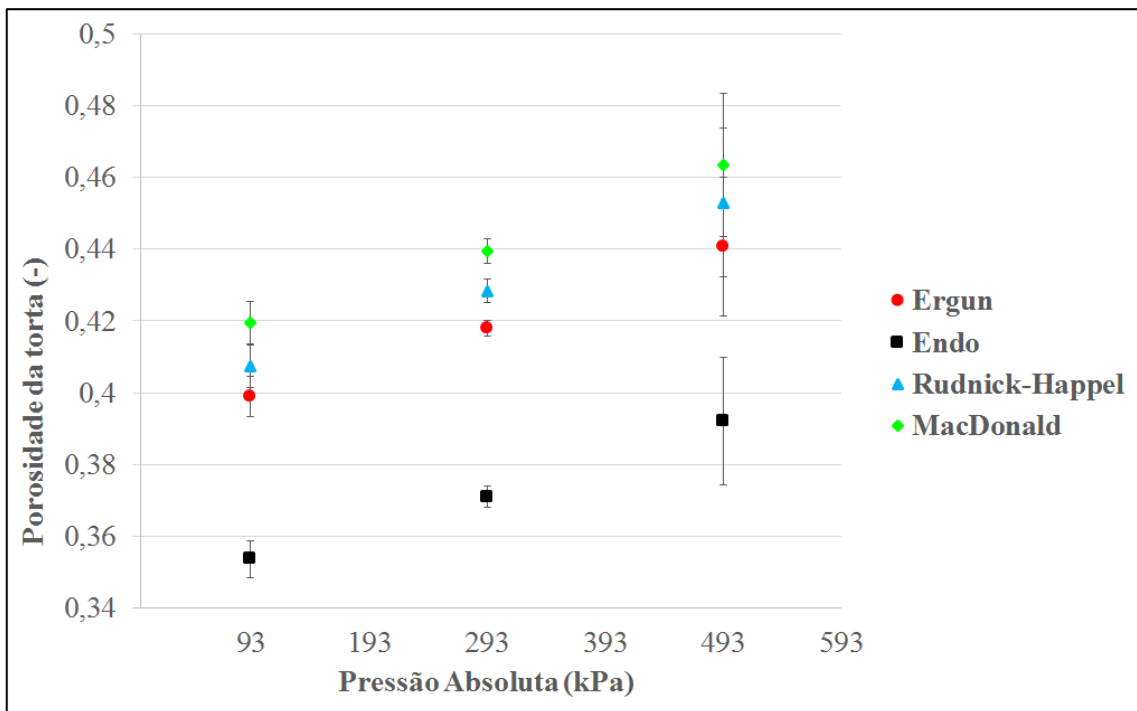


Figura 5.28. Porosidade das tortas de filtração formadas com velocidade de filtração de 6 cm/s utilizando o meio filtrante RAD Plus.



A comparação da porosidade calculada entre os meios filtrantes pode ser observada na Figura 5.29 para a correlação de Ergun, na Figura 5.30 para a correlação de

Rudnick-Happel, na Figura 5.31 para a correlação de MacDonalld e na Figura 5.32 para a para a correlação de Endo.

Figura 5.29. Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo Ergun.

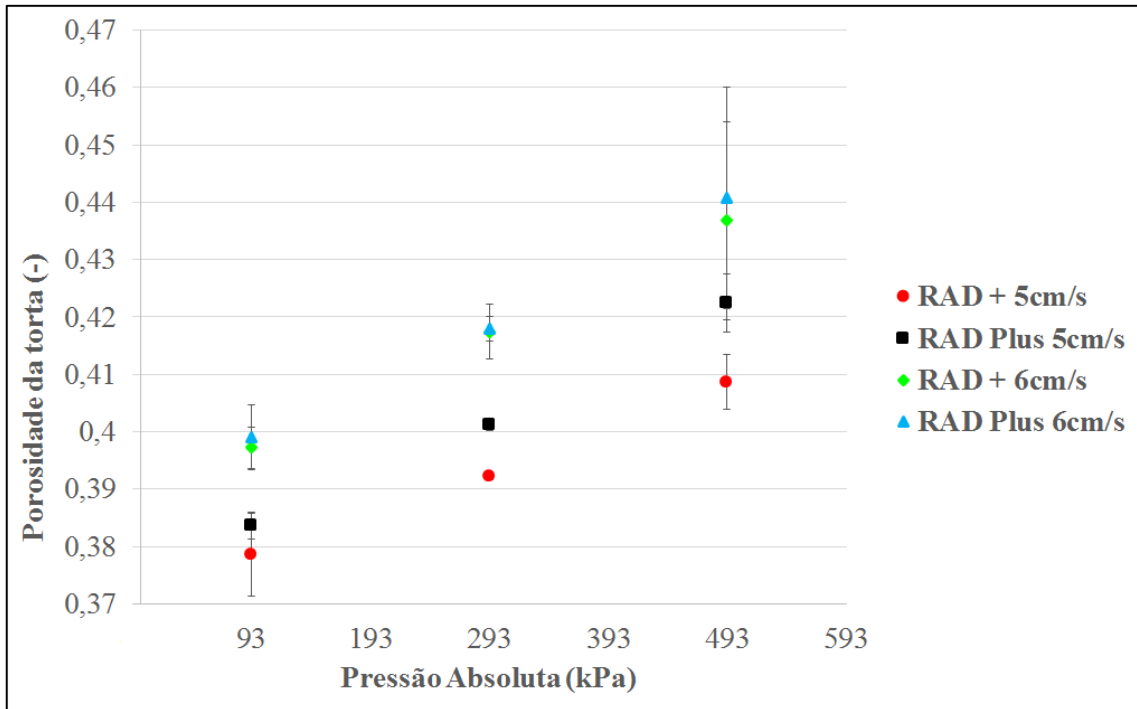


Figura 5.30. Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo Rudnick-Happel.

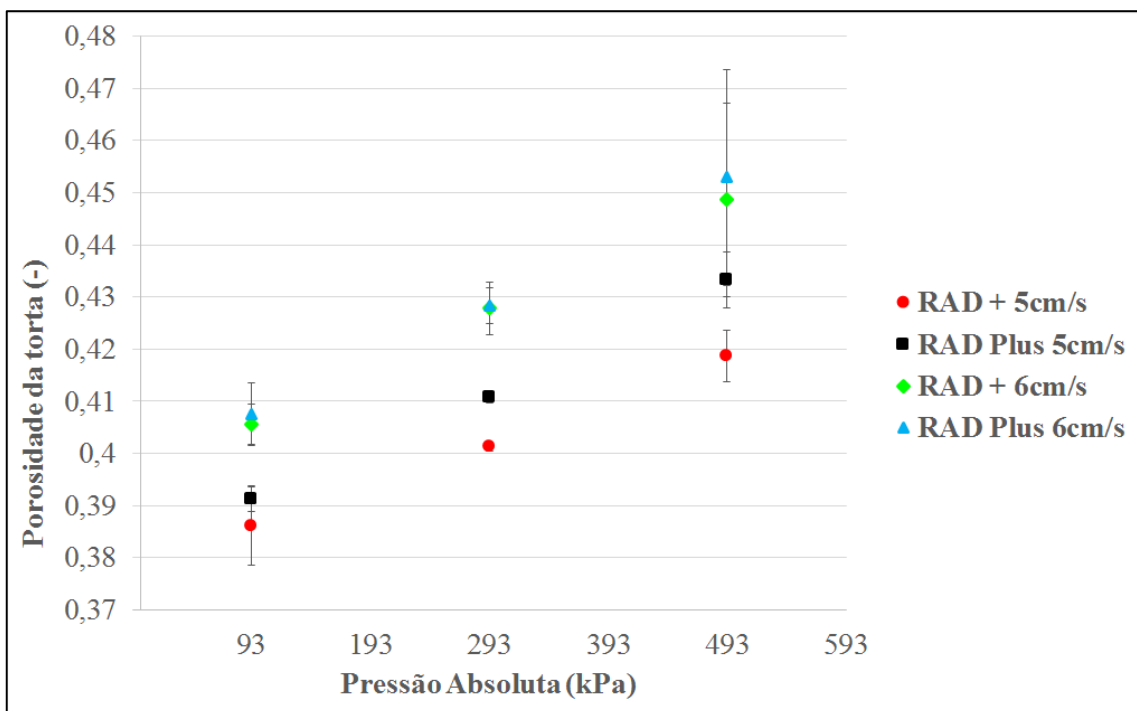


Figura 5.31. Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo MacDonald.

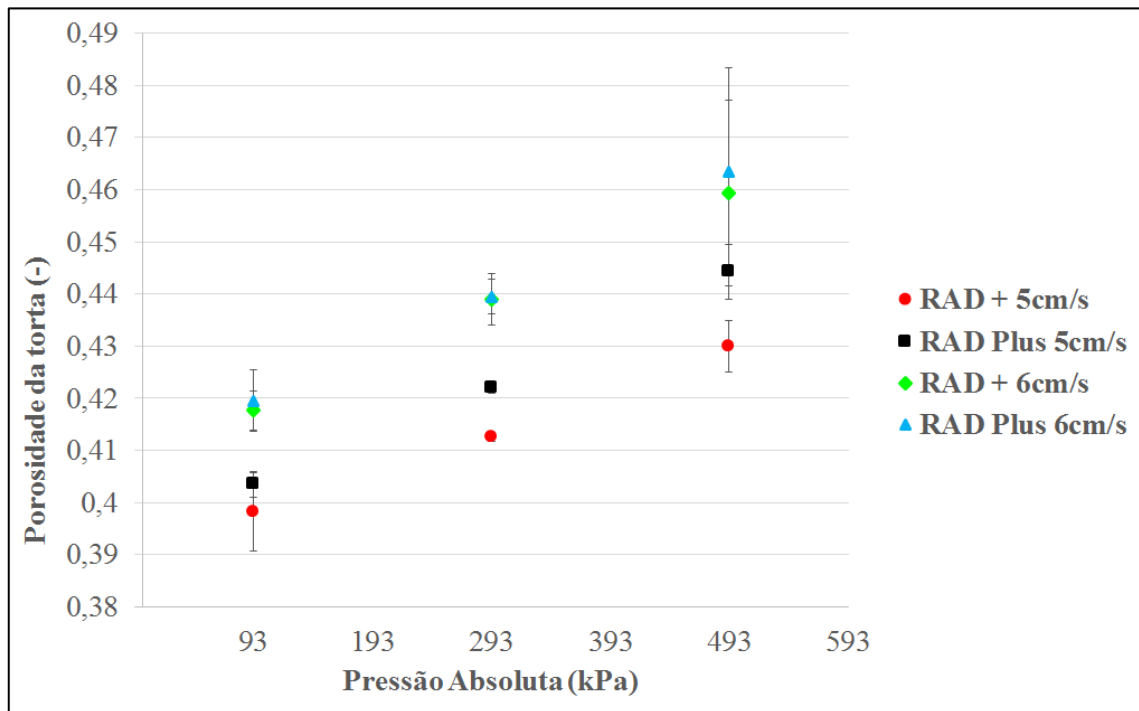
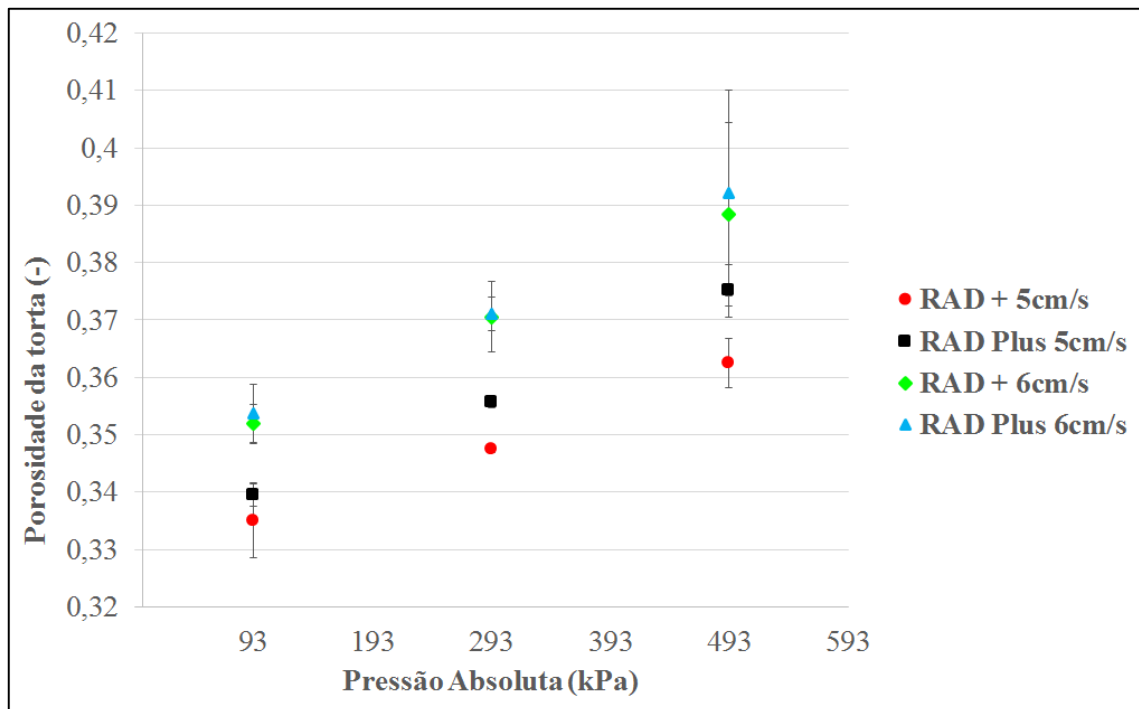


Figura 5.32. Porosidade das tortas de filtração para ambos os meios filtrantes e ambas as velocidades de filtração calculadas segundo Endo.



Foi observada uma porosidade das tortas formadas no meio filtrante RAD Plus maior em ambos os casos, considerando a média dos resultados. Porém, para as tortas formadas com velocidade de filtração de 6 cm/s os valores foram praticamente iguais para os dois meios filtrantes.

Um ponto importante a se destacar é a influência do tamanho das partículas na porosidade das tortas formadas. Fagnoli (2010) utilizou o talco de diâmetro de Stokes de 2,50 μm e obteve valores indiretamente de porosidade das tortas de filtração entre 0,7 e 0,8. Neste trabalho foi utilizado talco de diâmetro de Stokes de 10,03 μm e foram obtidos valores próximos a 0,4 de porosidade das tortas.

5.2.4. Penetração do material particulado

A seguir estão apresentados os dados de penetração do material particulado registrados pelo contador de partículas Klotz. Os valores da penetração do talco em função da pressão absoluta do sistema para os meios filtrantes RAD + e RAD Plus são apresentados nas Figuras 5.33 e 5.34, respectivamente.

Figura 5.33. Penetração do talco através do meio filtrante RAD + nos ensaios de filtração.

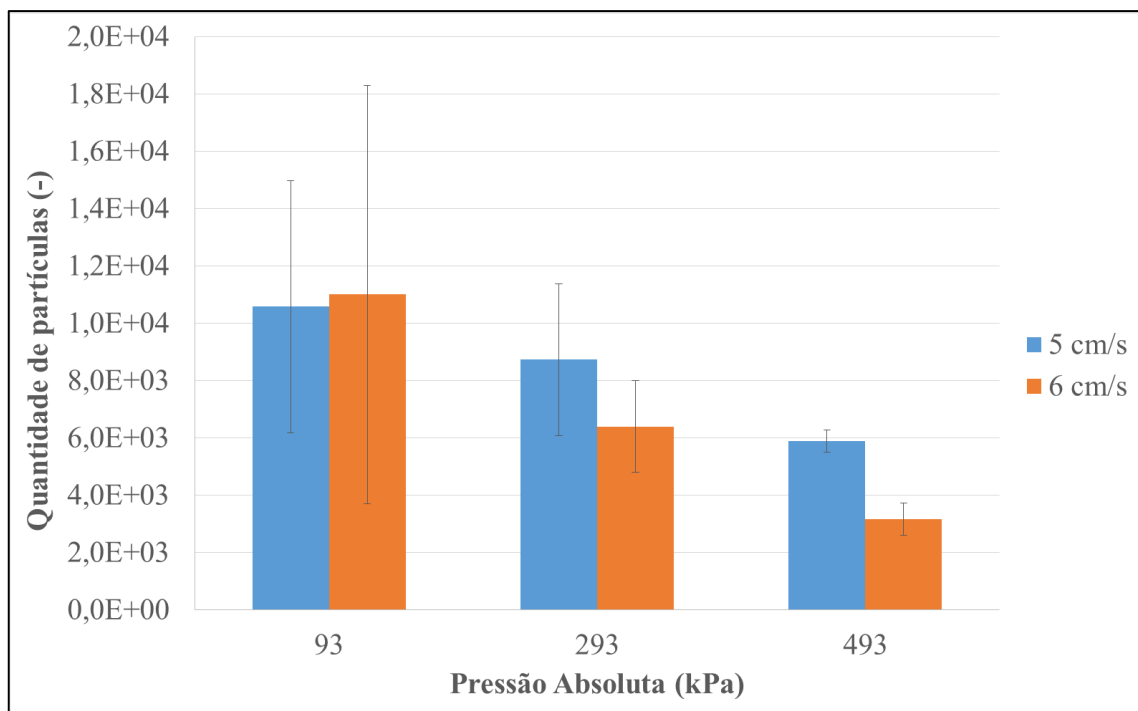
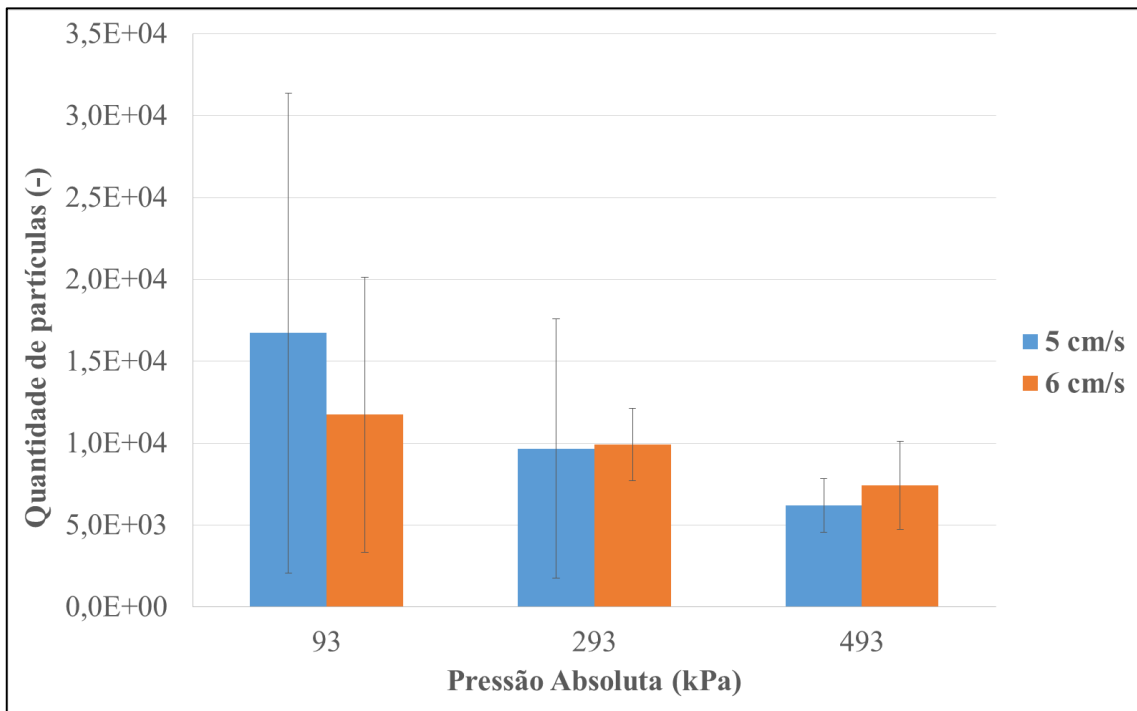


Figura 5.34. Penetração do talco através do meio filtrante RAD Plus nos ensaios de filtração.



Para o meio RAD + foi observada uma penetração menor nos ensaios realizados com velocidade superficial de 6 cm/s do que nos ensaios com velocidade de 5 cm/s, para as pressões de 293 kPa e 493 kPa. Para a pressão de 93 kPa a penetração pode ser considerada igual para as duas velocidades. Para o meio filtrante RAD Plus ocorreu um comportamento diferente. A penetração foi praticamente igual para as três pressões estudadas nos ensaios realizados com as duas velocidades de filtração.

A comparação da quantidade de partículas que penetraram os meios filtrantes RAD + e RAD Plus pode ser observada na Figura 5.35 para a velocidade de filtração de 5 cm/s e na Figura 5.36, para a velocidade de 6 cm/s.

Para a velocidade de filtração de 6 cm/s foi observada uma penetração menor nos ensaios realizados com o meio RAD + do que nos ensaios com o RAD Plus, para as pressões de 293 kPa e 493 kPa. Para a pressão de 93 kPa a penetração pode ser considerada igual para os dois meios filtrantes. Para os ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s a penetração foi praticamente igual para as três pressões estudadas nos ensaios realizados com as duas velocidades de filtração, considerando os erros calculados.

Figura 5.35. Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s.

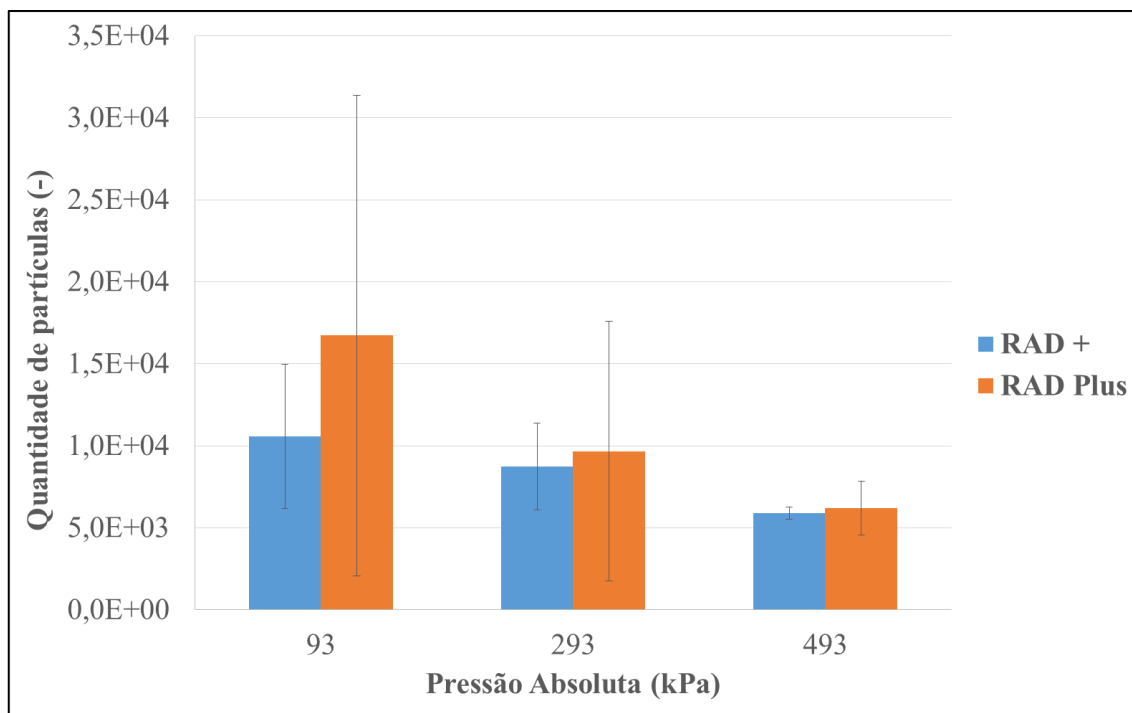
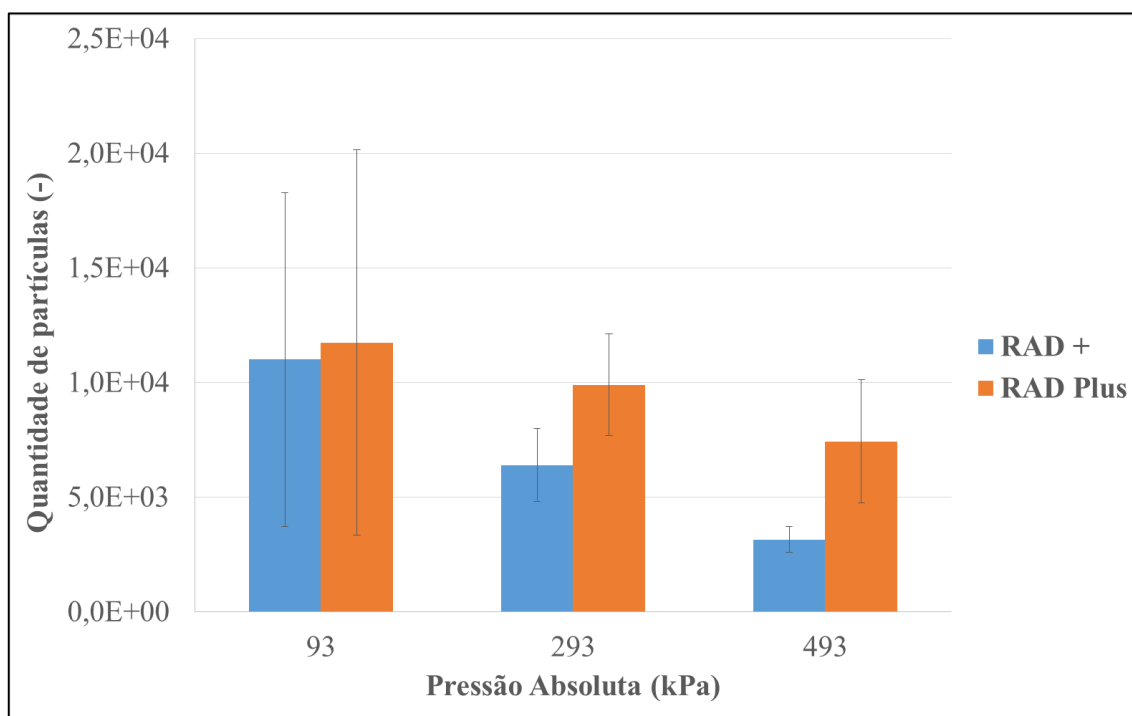


Figura 5.36. Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 6 cm/s.



5.3. Relação entre os parâmetros de desempenho

Para fazer uma relação entre a quantidade de massa retida pelos meios filtrantes, as porosidades calculadas e as resistências específicas das tortas de filtração formadas e a penetração do talco, foram feitas a Figura 5.37, que refere-se aos ensaios de filtração utilizando o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 5 cm/s, a Figura 5.38, que refere-se aos ensaios de filtração utilizando o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 6 cm/s, a Figura 5.39, que refere-se aos ensaios de filtração utilizando o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s, e a Figura 5.40, que refere-se aos ensaios de filtração utilizando o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.

A relação que se faz dos parâmetros de desempenho dos meios filtrantes é, à medida que a pressão do sistema aumenta, ocorre um aumento da massa retida, aumento da porosidade da torta de filtração, diminuição da resistência específica da torta de filtração e diminuição da penetração de material particulado através do meio filtrante. Ou seja, maior quantidade de massa de talco retida acarreta em menor penetração e tortas mais porosas são menos resistentes.

Figura 5.37. Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 5 cm/s.

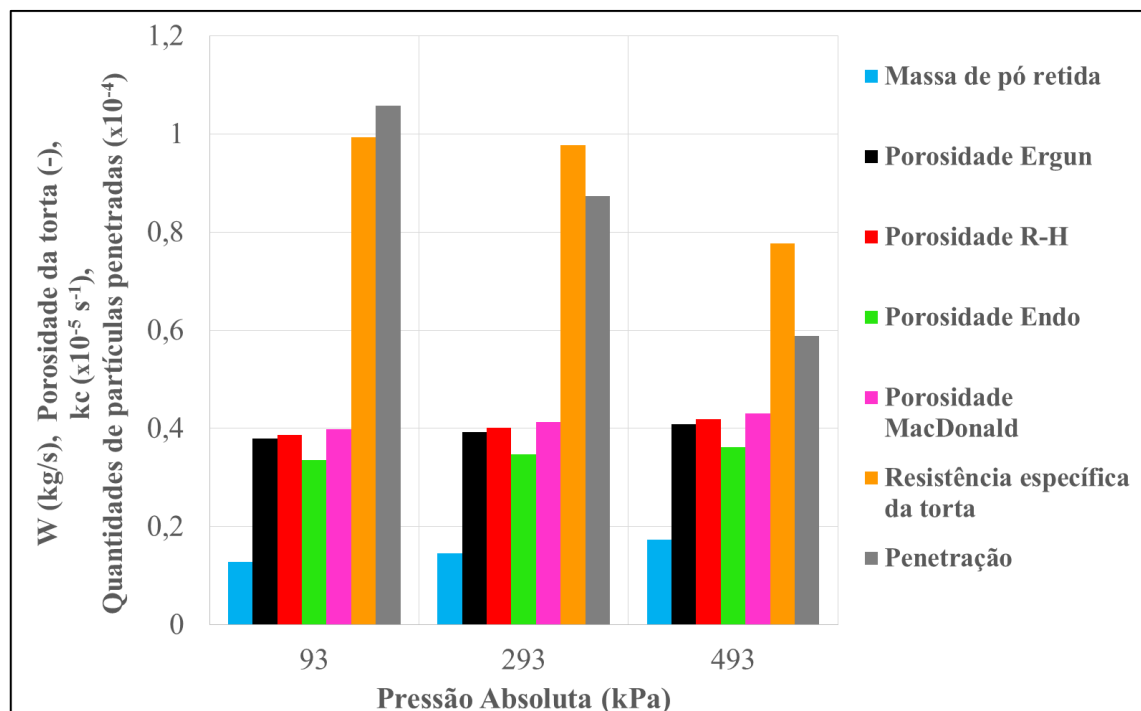


Figura 5.38. Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD + com velocidade de filtração de 6 cm/s.

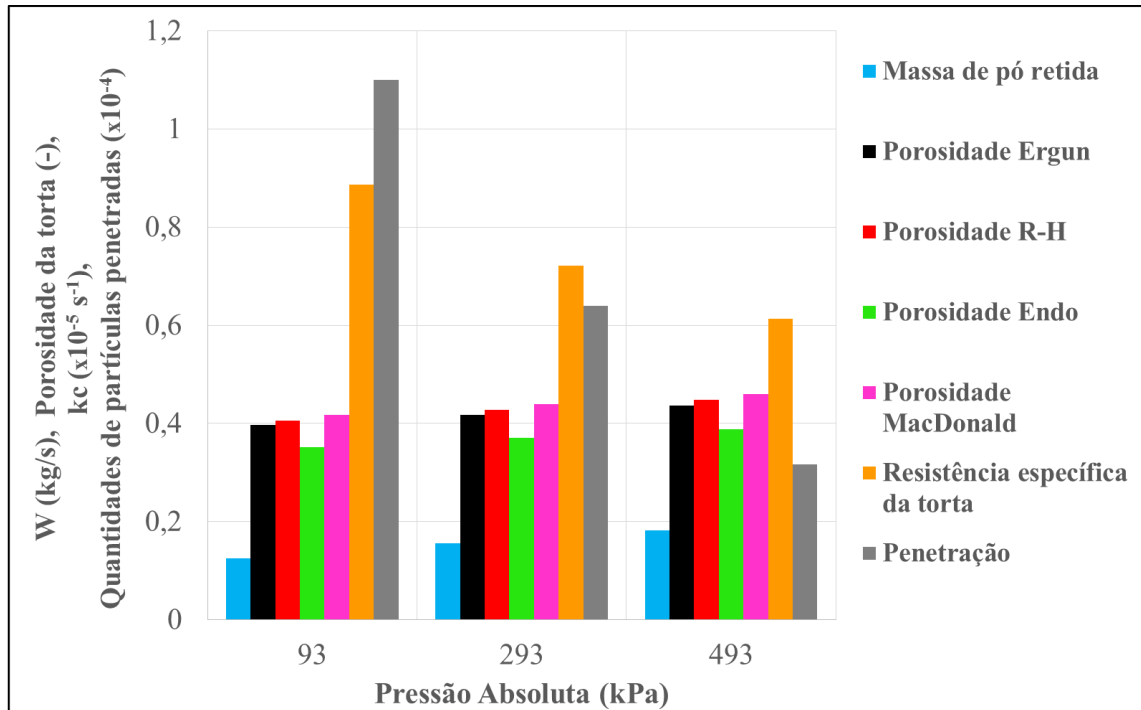


Figura 5.39. Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s.

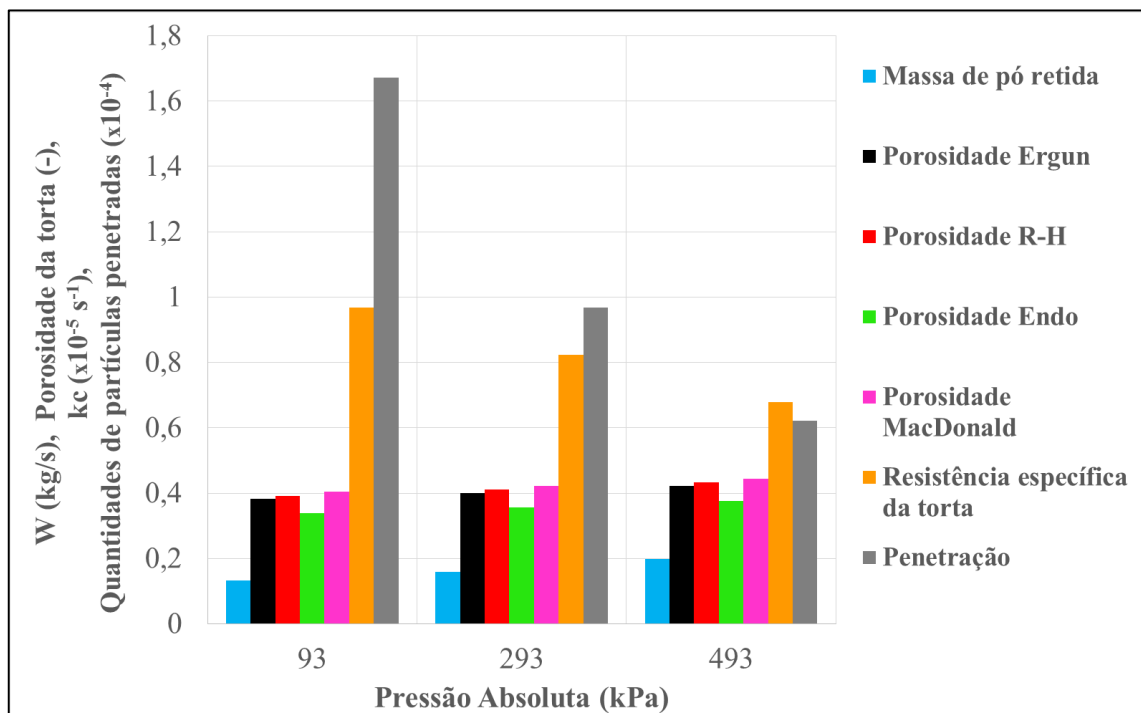
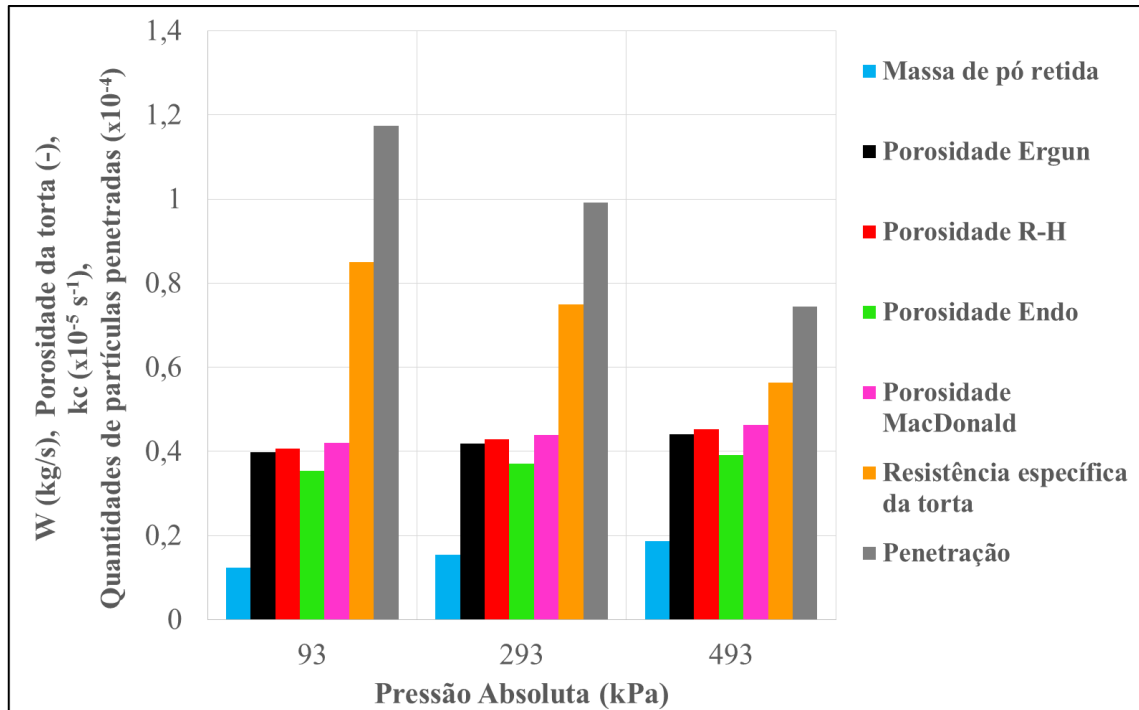


Figura 5.40. Parâmetros de desempenho em função da pressão do sistema para os ensaios realizados com o meio filtrante RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s.



A influência da pressão do sistema no processo de filtração se dá apenas nas propriedades do fluxo gasoso, pois foi visto que a estrutura do meio filtrante não foi modificada. Com isso pode ocorrer a formação de caminhos preferenciais do gás e também uma deposição das partículas diferentes no quesito tamanho. Isso faz com que sejam formadas tortas de filtração mais porosas e conseqüentemente menos resistentes e que ocorra uma retenção maior do material particulado.

6. CONCLUSÕES

As conclusões obtidas com o trabalho realizado até o momento foram:

- Constantes de permeabilidade k_1 e k_2 não possuem grande variação com a pressão do sistema, portanto podem ser consideradas constantes;
- O meio filtrante RAD Plus é menos permeável que o RAD +;
- Com o aumento da pressão do sistema a quantidade de massa de partículas coletada é maior, para uma mesma queda de pressão no filtro;
- Entre os meios filtrantes estudados o RAD Plus coletou maior massa de partículas nas mesmas condições de filtração, pois predomina a filtração superficial;
- As velocidades de filtração estudadas não obtiveram resultados com diferenças significativas nos ensaios de filtração;
- As propriedades físicas dos meios filtrantes influenciam diretamente na formação da torta de filtração, e não na filtração propriamente dita.
- A variação da pressão do sistema acarreta em variação na densidade do gás, que por sua vez altera os resultados do ensaios;
- A resistência específica das tortas de filtração decresce com o aumento da pressão do sistema, com valores menores para o meio filtrante RAD Plus quando comparado ao RAD + e valores menores para velocidades maiores de filtração;
- A porosidade das tortas de filtração aumenta com o aumento da pressão do sistema, com valores maiores para o meio filtrante RAD Plus quando comparado ao RAD + e tortas mais porosas para velocidades maiores de filtração;
- A quantidade de massa retida no meio filtrante, a resistência da torta formada, a porosidade das tortas e a penetração de material particulado estão relacionadas. Quanto maior massa foi retida, mais porosas foram as tortas, menos resistentes e menor quantidade de partículas penetraram os meios filtrantes.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para futuros trabalhos relacionados ao tema são:

- Uso de óxido de ferro como material particulado, por ser o material encontrado nos gasodutos;
- Mudança do aparato experimental para uso de partículas mais pesadas, como o óxido de ferro, a fim de que elas não se depositem ao longo da linha, e também para facilitar a retirada do meio filtrante sem destruir a torta formada;
- Uso de outros materiais filtrantes ainda não testados no equipamento de alta pressão;
- Ensaio com maior variação da velocidade de filtração;
- Avaliação das partículas sedimentadas na tubulação durante os ensaios de filtração;
- Determinação da porosidade experimental das tortas de filtração para comparar com os resultados obtidos indiretamente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, T. **Powder sampling and particle size determination**. 5ª ed. London. Chapman & Hall. 2003.
- AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. **Cake formation in fabric filtration of gases**. Industrial Chemical Engineering Research. Vol. 35, p.3673-3679, 1996.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Geologia, mineração e transformação mineral**. Disponível em: <www.mme.gov.br/sgm/noticias/destaque_foto/destaque_0014.html>. Acesso em: 12/08/2014.
- CAMPOS, L.E.G. **Talco e Pirofilita**. Balanço Mineral Brasileiro. p.1-19, 2001.
- CARVALHO, I.G. **Chemicals deposits associated to Mecavolcanosedimentary sequences of the central portion of the São Francisco Craton in the State of the Bahia, Brazil: a review**. Revista Brasileira de Geociências, 30 (2): 279-284, 2000.
- CASTRO, B.J.C.; AGUIAR, M.L. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases a altas pressões**. Relatório de Iniciação Científica. UFSCar, São Carlos, Brasil, 2012.
- COURY, J.R. **Electrostatic effects in granular bed filtration of gases**. Tese de Doutorado. Cambridge University. Cambridge, UK. 1982.
- DICKENSON, C. **Filters and filtration handbbok**. 3ª ed. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1994.
- DULLIEN, F. A. L. **Introduction to industrial gas cleaning**. San Diego: Academic Press, 1989, p. 285.
- ENDO, Y.; CHEN, D. R.; PUI, D.Y.H. **Air and water permeation resistance across dust cakes on filters – effects of particle polydispersity and shape factor**. Powder Technology. Vol. 98, p.241, 1998.
- ERGUN, S. **Fluid flow through packed columns**. Chemical Engineering Progress, v.48, n.2, p. 889-894, 1952.
- FARGNOLI, A. G. **Estudo da compressibilidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos**. Dissertação de mestrado, PPGEQ-UFSCar, São Carlos - SP, 2010.
- FRANCO, K. S. **Filtração de gases a altas pressões**. Dissertação de mestrado, PPGEQ-UFSCar, São Carlos - SP, 2012.
- GASCAT. **Tecnologia na filtração de gás natural**. Disponível em: <<http://gascat.com.br/catalogos/FILTROS.pdf>>. Acesso em: 25/08/2013.
- INNOCENTINI, M. D. M.; SALVANI, V. R.; PARDO, A. R. F.; PANDOLFELLI, V. C. **How accurate is Darcy's Law for refractories**. American Ceramic Society Bulletin. Vol.78, p.64-68, 1999.

INNOCENTINI, M. D. M.; SEPULVEDA, F.; ORTEGA, F. **Permeability**, in M. Sheffler, P. Colombo(Eds.). Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications. p.313-340, 2005.

JACOMINO, V. M. F. et al. **Avaliação da qualidade do ar em um pólo produtor de ferro-gusa**. Eng Sanit Ambient, Vol. 14, nº 4, p. 511-520, Out/Dez, 2009.

JEON, K.; JUNG, Y.A. **Simulation study on the compression behavior of dust cakes**. Powder Technology. Vol. 141, p.1-11, 2004.

JOHANSSON, C.; NORMAN, M.; GIDHAGEN, L. **Spatial & temporal variations of PM10 and particle number concentrations in urban air**. Environmental Monitoring and Assessment 127, p. 477-487, 2007.

LEITH, D.; ALLEN, R. W. K. Dust filtration by fabric filters. Progress in filtration, R. J. Walkman (ed), Elsevier, NL, v.4, p.1-57, 1986.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 364 p., 2002.

LUCAS, R. D. **Influência das variáveis operacionais e do tipo de material pulverulento na formação e remoção de tortas de filtração de gases em filtros de tecidos**. Dissertação de mestrado, PPGEQ-UFSCar, São Carlos - SP, 2000.

MACDONALD, J. F. et al. **Flow through porous media – the Ergun equation revisited**. Industrial Engineering Chemistry Fundamentals, vol.18, 1979.

MINERALS YEARBOOK. **US Dept. of Interior**, Bureau of Mines, Washington D.C., 1980.

OSÓRIO, V.M. **Comportamento da filtração de gases em meios filtrantes de celulose**. Dissertação de Mestrado. PPGEQ-UFSCar, São Carlos, Brasil, 2006.

PALL, 2009. **Black powder removal from transmission pipelines: Diagnostics and Solutions**. Disponível em: <www.pall.com/pdf/FCBLACKPEN.pdf>. Acesso em: 18/10/2013.

PITCH, J. **Gas filtration theory**. In: MATESSON, M.J.; ORR, C. **Filtration: principles and practices**. 2ª ed, New York: Dekker, p.1-37, 1987.

QUEIROZ, P. G. M. **Composição elementar do material particulado presente no aerossol atmosférico do município de Sete Lagoas, Minas Gerais**. Quimica Nova, Vol. 30, nº 5, p. 1233-1239, 2007.

RICCO, E. J. **Projeto e construção de bancada para ensaios de filtração de gases a alta pressão**. Dissertação de mestrado, PPGEQ-UFSCar, São Carlos - SP, 2009.

RUDNICK, S. N.; FIRST, M.W. Proceedings of the 71st **Annual Meeting of the Air Pollution Control Association**. Paper No. 78-62-7., Houston, Texas, USA, 1972.

SILVA, C.R.N.; NEGRINI, V.S.; AGUIAR, M.L.; COURY, J.R. **Influence of gas velocity on the cake formation and detachment.** Powder Technology. Vol. 101, p.165-172, 1999.

SILVA, J.M. et al. **Caracterização de resíduos sólidos colhidos em dutos de gás natural – parte II,** In: 6º COTEC – Conferência sobre tecnologia de equipamentos e 22º CONBRASCORR – Congresso brasileiro de corrosão, Salvador – BA, 2002.

TANABE, E. H. **Desempenho de meios filtrantes na filtração de gases a alta pressão.** Tese de Doutorado, PPGEQ-UFSCar, São Carlos - SP, 2011.

APÊNDICE A – PROBLEMAS ENCONTRADOS

Durante a execução deste trabalho alguns problemas foram encontrados. Como a escassez de trabalhos sobre o tema de filtração de gases a altas pressões na literatura e a dificuldade de iniciar a operação do aparato experimental, possivelmente devido ao tempo em que o mesmo esteve inoperante. Os principais problemas pontuais foram:

- O equipamento possui muitas partes móveis, o que ocasiona vários vazamentos em diferentes localidades;
- O software de aquisição permite apenas alterar valores de calibração em seu setup, não oferecendo informações de como realmente funciona;
- O computador onde está instalado o software de aquisição é antigo e durante um período de tempo ficou inoperante;
- A fonte de energia do sistema de aquisição de dados queimou, fazendo com que os dados não fossem mensurados;
- Rotâmetro usado inicialmente estava descalibrado, tendo que ser substituído;
- O material particulado escolhido inicialmente teve de ser substituído, pois não era arrastado pelo fluxo gasoso devido ao seu peso;
- Falta de resina para preparo das tortas para análise da porosidade experimental.

Os problemas citados acima ocorreram individualmente, o que demandou tempo para que fossem solucionados.

Uma ressalva deve ser feita sobre a importância da calibração dos equipamentos para a realização de um trabalho representativo.

APENDICE B – DADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção todos os dados de média e os erros citados no texto. Esses erros foram calculados como desvio-padrão, como mostra a Equação B.1. As tabelas também indicam as figuras as quais estão relacionadas.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(a - \bar{a})^2}{(n - 1)}} \quad (\text{B.1})$$

em que σ representa o desvio-padrão, a representa a amostra, \bar{a} representa a média de amostras e n representa a quantidade de amostras.

B1 - Permeabilidade dos meios filtrantes

Os valores de x referem-se ao valor fixo da velocidade superficial do gás, os valores de y referem-se a média das perdas de carga obtidas pelo sistema de aquisição e calculadas segundo o termo da Equação 3.1.

→ RAD +

Tabela B1. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 93 kPa (Figura 5.1).

93 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,02375	39062,29526	14503,81803
66667	104512,888	4276,080925
0,097727	169762,2528	8483,160079
0,128788	226853,0127	10520,67041
0,156818	279575,9017	18078,78524
0,188258	358365,2341	33029,49053
0,220833	430444,4907	24803,8201

Tabela B2. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 193 kPa (Figura 5.1).

193 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,011382	24925,99	3331,798815
0,031941	49310,95	12670,74322
0,046862	84083,47	6537,010376
61705	120144,3	8036,489559
0,070609	140528,3	16380,37826
0,078101	155944,2	21805,40737
0,088714	182514,2	23504,21035
0,096237	194612,4	17635,81473
0,102751	217381,2	15262,08353
0,11211	253831,6	11644,68447

Tabela B3. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 293 kPa (Figura 5.1).

293 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,012172	15316,72	11311,23008
0,021986	27995,7	21349,0623
0,032709	46085,34	4635,166595
0,042499	81286,84	2618,700456
0,047413	97828,5	14395,52903
54361	111284,2	6652,385435
62461	122184,7	2479,273104
6959	144477,1	18103,97114

Tabela B4. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 393 kPa (Figura 5.1).

393 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,012708	15316,72	11311,23008
0,023641	27995,7	21349,0623
0,03093	46085,34	4635,166595
0,037518	81286,84	2618,700456
0,041943	97828,5	14395,52903
0,047198	111284,2	6652,385435

Tabela B5. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD + para a pressão absoluta de 493 kPa (Figura 5.1).

493 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,022916	45022,99	2673,447344
0,030587	63725,62	17602,65235
0,037537	86069,45	12638,5883
0,041359	99160,49	3399,973248
0,043221	115605,1	N/A

→ **RAD Plus**

Tabela B6. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 93 kPa (Figura 5.2).

93 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,032576	94080,63	13439,50422
63636	219590,8	25326,53937
0,094697	366951,3	7343,672761
0,125379	524678,1	5062,824464
0,156818	693176	16360,13796
0,188258	845089,8	9039,18146
0,220833	976283	14890,62425

Tabela B7. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 193 kPa (Figura 5.2).

193 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,014182	67959,31	17655,53785
0,03943	174205	7857,413504
51221	261112,7	15028,19181
61709	306464,9	10494,08733
0,072018	349819,1	8813,100674
0,08261	426392,5	7270,934705
0,093314	488842,9	16424,82279
0,101036	533034,3	1114,847805
0,109194	570194,2	3240,224754

Tabela B8. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 293 kPa (Figura 5.2).

293 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,01214	46795,77	4471,747716
0,02188	81456,4	12146,94984
0,031645	131291,8	17852,26436
0,041407	194634,1	11750,5799
0,047198	216709,7	14581,27976
55207	264988,2	14339,01981
59109	304185,8	7559,917437
65191	331884,7	19442,25636
69375	356856,6	3142,70604

Tabela B9. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 393 kPa (Figura 5.2).

393 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,012671	52738,99	10456,39194
0,022876	104549,8	15495,77719
0,03083	135050,4	7423,197929
0,034439	181115,3	12057,68306
0,039642	207683,8	2591,38078
0,04335	241669,2	9365,551581
0,047816	250874,7	18652,69434
51735	275793,3	13720,90109

Tabela B10. Dados experimentais de permeabilidade do meio filtrante RAD Plus para a pressão absoluta de 493 kPa (Figura 5.2).

493 kPa		
x (m/s)	y (Pa/m)	Desvio-Padrão (Pa/m)
0	0	0
0,024556	119333,9	15754,90348
0,034509	184008,9	1370,63107
0,038143	189956,5	9471,786862
0,041162	206094,4	5551,274651

→ Constantes de permeabilidade k1 e k2

Tabela B11. Constantes de permeabilidade k1 para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus (Figura 5.3).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	k1 (m ²)	Desvio-Padrão (m ²)	k1 (m ²)	Desvio-Padrão (m ²)
93	1,3E-11	1,23E-12	5,3E-12	1,23E-14
193	1,2E-11	1,48E-12	4,2E-12	2,33E-13
293	1,4E-11	7,9E-13	5,5E-12	8,94E-13
393	1,2E-11	8,91E-12	4,7E-12	3,65E-13
493	1,6E-11	4,21E-12	3,9E-12	1,07E-12

Tabela B12. Constantes de permeabilidade k2 para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus (Figura 5.4).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	k2 (m)	Desvio-Padrão (m)	k2 (m)	Desvio-Padrão (m)
93	7,2294E-07	5,499E-07	2,4478E-07	1,841E-09
193	1,7834E-07	1,482E-08	1,6408E-07	6,61E-08
293	9,2357E-08	4,298E-09	4,7459E-08	1,612E-08
393	1,2339E-07	1,269E-07	4,3227E-08	1,718E-08
493	5,1937E-08	3,749E-08	3,8354E-08	1,788E-08

B2 - Ensaios de filtração

Os valores de x referem-se ao valor fixo da massa de pó depositada no meio filtrante, os valores de y referem-se a média das perdas de carga nos meios filtrantes obtidas pelo sistema de aquisição.

B2.1 – Filtração de gases com velocidade superficial fixa de 5 cm/s

→ RAD +

Tabela B13. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD + (Figuras 5.5, 5.7 e 5.15).

93 kPa		
x (kg/m ²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	59,72402	28,10621878
0,02	76,53014	37,99734142
0,03	164,4255	13,30770128

0,04	213,3946	13,96901323
5	269,0506	21,77285988
6	310,5956	23,7119668
0,07	365,6159	25,82504471
0,08	458,6217	45,54639218
0,09	502,4549	42,98202434
0,10	543,3897	45,91918112
0,11	598,8932	32,24660781
0,12	703,3658	55,44221848

Tabela B14. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD + (Figuras 5.5, 5.8 e 5.16).

293 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	26,8237	0,143790164
0,02	72,29686	0,161856742
0,03	112,7485	11,34435451
0,04	171,5827	43,48973991
5	233,9891	59,25679984
6	304,7223	96,14850516
0,07	362,1708	91,49209387
0,08	420,0897	55,57121788
0,09	459,1302	10,93082432
0,10	515,4092	12,85460731
0,11	540,7201	36,60408963
0,12	561,3527	22,41911041
0,13	642,3281	11,09869448
0,14	659,1893	17,16940825
0,145	696,056	2,89448504

Tabela B15. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD + (Figuras 5.5, 5.9 e 5.17).

493 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	29,84929	14,85016164
0,02	54,2576	24,55851148
0,03	79,36508	59,31075916
0,04	100,226545	78,74544055
5	132,681975	82,53887044
6	160,993045	119,6642958
0,07	215,975275	144,7441571

0,08	270,143905	134,5503926
0,09	319,430875	121,3362922
0,1	385,20614	106,8097238
0,11	425,47984	65,96276721
0,12	471,76662	20,35156554
0,13	548,01712	50,15975089
0,14	599,770355	11,1286233
0,15	611,66939	4,224906449
0,16	662,926815	35,00397063
0,17	669,27043	N/A
0,18	688,11057	N/A

→ **RAD Plus**

Tabela B16. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD Plus (Figuras 5.6, 5.7 e 5.18).

93 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	98,20524	23,9652206
0,02	135,644	33,76345785
0,03	176,5025	34,95003959
0,04	187,0921	7,353168062
5	241,0573	22,32918764
6	309,6294	17,79861307
0,07	349,1531	20,22572174
0,08	351,7591	5,069906124
0,09	415,1445	16,79183444
0,10	478,034	14,22092146
0,11	533,6773	31,17456314
0,12	577,2944	17,27725617
0,13	686,8012	3,146229196

Tabela B17. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD Plus (Figuras 5.6, 5.8 e 5.19).

293 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	28,04413	12,54893919
0,02	49,88446	3,775469379
0,03	77,02599	11,27247003
0,04	116,3717	5,177775263

5	144,5556	1,31241847
6	184,2318	15,13782682
0,07	230,6966	8,395931361
0,08	283,238	9,420663438
0,09	322,2912	10,85894691
0,10	383,134	6,903702708
0,11	456,0665	4,800258024
0,12	499,1751	19,41667138
0,13	556,1914	20,11782432
0,14	610,1312	42,17733558
0,15	654,8797	28,1541636
0,16	711,6121	12,88451086

Tabela B18. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 5 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD Plus (Figuras 5.6, 5.9 e 5.20).

493 kPa		
x (kg/m ²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	39,8796025	14,60985096
0,02	58,4210125	22,49230776
0,03	83,45859	27,45378762
0,04	114,4711025	29,85999795
5	139,3497825	39,14215201
6	188,9164075	89,97347093
0,07	211,7229225	80,42063113
0,08	247,51541	73,66350249
0,09	272,0063375	69,50234028
0,10	318,146925	44,91916337
0,11	333,5800875	45,27196884
0,12	374,533905	40,12595034
0,13	396,1072725	37,05479718
0,14	455,437235	29,59748275
0,15	505,2708575	47,50986499
0,16	564,2067225	67,98185316
0,18	629,36966	9,589682121
0,19	673,6605367	42,27559988
0,20	715,5840728	1,673980238

B2.2 – Filtração de gases com velocidade superficial fixa de 6 cm/s

→ RAD +

Tabela B19. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD + (Figuras 5.10, 5.12 e 5.15).

93 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	87,85292	64,19378387
0,02	114,3885	62,75825446
0,03	178,901	39,07107802
0,04	210,6911	30,74428871
5	269,1947	35,34136169
6	306,7394	29,14225801
0,07	349,7506	42,9443316
0,08	407,9322	45,7223607
0,09	457,1979	57,52916216
0,10	532,4399	53,89955259
0,11	589,1468	43,99927994
0,12	658,024	14,15150548
0,125	679,9872	27,16534548

Tabela B20. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD + (Figuras 5.10, 5.13 e 5.16).

293 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	31,46127	16,87501544
0,02	55,53905	20,10001636
0,03	85,24089	14,20450626
0,04	121,2838	22,91310335
5	164,5933	30,59383465
6	219,5476	40,38849243
0,07	268,8981	51,20525508
0,08	334,6123	65,716437
0,09	376,9556	70,4594458
0,10	433,9236	73,08971437
0,11	482,1198	66,85532664
0,12	527,087	66,39283084
0,13	578,5936	66,25232378
0,135	593,5945	79,09000217

0,14	597,7363	54,87832156
0,15	654,9099	68,22153716
0,16	683,5722	5,051903185

Tabela B21. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD + (Figuras 5.10, 5.14 e 5.17).

493 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	37,743905	13,35794713
0,02	54,42289	24,10903198
0,03	71,54684	33,43982922
0,04	105,87101	38,72549483
5	137,309405	50,82494746
6	173,006545	67,6527312
0,07	212,55562	69,72024779
0,08	257,825385	103,7533891
0,09	282,780325	86,22443826
0,1	324,99906	81,13654334
0,11	366,55673	93,88324616
0,12	404,173465	73,44178614
0,13	448,78218	79,89603763
0,14	509,61224	92,75060252
0,15	555,25067	105,9467565
0,16	608,28788	124,8240893
0,18	688,79713	N/A
0,19	700,23853	N/A

→ **RAD Plus**

Tabela B22. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 93 kPa utilizando o meio RAD Plus (Figuras 5.11, 5.12 e 5.18).

93 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	51,3998	35,9149278
0,02	92,11082	37,51165729
0,03	148,911	39,59864131
0,04	203,1737	64,3625041
5	247,4391	82,97441877
6	302,6426	111,9455666
0,07	376,2619	140,904483

0,08	390,412	69,37953364
0,09	452,9811	109,0352073
0,10	511,1695	82,53984948
0,11	566,798	76,31255843
0,12	606,6394	70,71771239
0,125	692,3566	N/A

Tabela B23. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 293 kPa utilizando o meio RAD Plus (Figuras 5.11, 5.13 e 5.19).

293 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	37,03619	15,83099611
0,02	52,38461	20,01877853
0,03	79,5812	14,71727196
0,04	109,0576	16,79325378
5	145,8735	19,6907055
6	200,1311	42,78270526
0,07	241,1591	48,16164851
0,08	307,6123	76,06187813
0,09	345,2418	77,16207369
0,10	394,7788	66,84883686
0,11	439,1883	43,96889131
0,12	486,3608	49,51602971
0,13	538,9064	38,75287978
0,135	554,9752	63,25458604
0,14	588,74	63,49678303
0,15	638,1901	72,82827757
0,16	683,5722	5,051903185

Tabela B24. Dados experimentais do ensaio de filtração com velocidade superficial de 6 cm/s para a pressão absoluta de 493 kPa utilizando o meio RAD Plus (Figuras 5.11, 5.14 e 5.20).

493 kPa		
x (kg/m²)	y (Pa)	Desvio-Padrão (Pa)
0	0	0
0,01	33,31988	5,231670942
0,02	28,705185	9,672421736
0,03	55,795865	20,76508866
0,04	87,70461	24,75630338
5	112,82483	32,307228
6	142,928395	51,97562232
0,07	167,057025	61,43227042
0,08	197,89791	82,03551648

0,09	238,47673	83,97718927
0,10	277,21218	102,0095153
0,11	317,89268	109,7402572
0,12	361,115705	106,1445697
0,13	400,38509	138,6675006
0,14	456,14281	144,8161193
0,15	503,14148	152,2412214
0,16	540,99977	198,1940122
0,18	581,7311	N/A
0,19	615,26708	N/A
0,2	672,62658	N/A
0,205	695,00087	N/A

B2.3 – Resistência específica das tortas de filtração

Tabela B25. Resistência específica da torta, k_c , para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.21, 5.22 e 5.23).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	k_c (s^{-1})	Desvio-Padrão (s^{-1})	k_1 (s^{-1})	Desvio-Padrão (s^{-1})
93	99279	3864,65	96692,5	601,7479
293	97732	1292,591	82324,5	1481,389
493	77619,5	7525,737	67918,25	4099,646

Tabela B26. Resistência específica da torta, k_c , para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s. (Figuras 5.21, 5.22 e 5.24).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	k_c (s^{-1})	Desvio-Padrão (s^{-1})	k_1 (s^{-1})	Desvio-Padrão (s^{-1})
93	88709,33	5722,853	85030,5	10365,94
293	72179	6619,527	74889,33	4052,24
493	61244	9502,101	56440,5	11557,66

B2.4 – Porosidade calculada das tortas de filtração

Tabela B27. Porosidade calculada pela correlação de Ergun, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.25, 5.27 e 5.29).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.37861447	0.007155297	0.38361372	0.002321886
293	0.392265939	0.000631759	0.401252706	0.001011898
493	0.408651323	0.004734221	0.422376729	0.005036867

Tabela B28. Porosidade calculada pela correlação de Ergun, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s. (Figuras 5.26, 5.28 e 5.29).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.397244154	0.003629809	0.399043478	0.005653145
293	0.417436238	0.004756671	0.417957838	0.002166416
493	0.436776035	0.017285402	0.440812822	0.019317447

Tabela B29. Porosidade calculada pela correlação de Rudnick-Happel, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.25, 5.27 e 5.30).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.38605629	0.007476696	0.391280252	0.002430359
293	0.4012133	0.000664036	0.410677996	0.001067325
493	0.418663555	0.005008671	0.433224471	0.0053544

Tabela B30. Porosidade calculada pela correlação de Rudnick-Happel, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s. (Figuras 5.26, 5.28 e 5.30).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.405580677	0.003817646	0.407476121	0.005951506
293	0.42780226	0.005048277	0.428354157	0.003364895
493	0.448612253	0.01849156	0.452943908	0.020702209

Tabela B31. Porosidade calculada pela correlação de Endo, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.25, 5.27 e 5.32).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.335016832	0.006520768	0.339573156	0.00211922
293	0.347474666	0.000577456	0.355696977	0.000926742
493	0.362480603	0.004343367	0.375094215	0.004634765

Tabela B32. Porosidade calculada pela correlação de Endo, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s. (Figuras 5.26, 5.28 e 5.32).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.352028726	0.003322216	0.353677513	0.005177246
293	0.370549484	0.006183038	0.371027648	0.002914781
493	0.388384152	0.015963512	0.392118659	0.017858847

Tabela B33. Porosidade calculada pela correlação de MacDonald, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.25, 5.27 e 5.31).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.398256457	0.007477627	0.403522286	0.00240726
293	0.412633908	0.000844573	0.422081758	0.001048055
493	0.430024047	0.004904534	0.444234006	0.005212284

Tabela B34. Porosidade calculada pela correlação de MacDonald, para as pressões estudadas e os erros calculados, para os meios RAD + e RAD Plus com velocidade de filtração de 6 cm/s. (Figuras 5.26, 5.28 e 5.31).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)	Porosidade (-)	Desvio-Padrão (-)
93	0.417691083	0.003758081	0.419553929	0.005852284
293	0.438948585	0.004921109	0.439489204	0.003280046
493	0.459298004	0.017863273	0.463466475	0.019955716

B2.5 – Penetração do talco

Tabela B35. Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.33, 5.34 e 5.35).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Penetração (-)	Desvio-Padrão (s ⁻¹)	Penetração (-)	Desvio-Padrão (s ⁻¹)
93	10577.5	4398.410129	16725.5	14657.61647
293	8735.5	2644.798984	9672	7930.342027
493	5885.5	383.9589822	6212.5	1645.43748

Tabela B36. Penetração do talco através dos meios filtrantes RAD + e RAD Plus nos ensaios com velocidade de filtração de 5 cm/s. (Figuras 5.33, 5.34 e 5.36).

Pressão (kPa)	RAD +		RAD Plus	
	Penetração (-)	Desvio-Padrão (s ⁻¹)	Penetração (-)	Desvio-Padrão (s ⁻¹)
93	11004	7290.270914	11743.5	8399.721454
293	6401.333333	1593.19187	9909.333333	2207.607831
493	3161.333333	560.5437836	7441	2690.603464