

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

**DESEMPENHO DE FILTROS CERÂMICOS NA FILTRAÇÃO
DE GASES A ALTAS TEMPERATURAS**

Gracinda Marina Castelo da Silva

São Carlos - SP
2008

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

**DESEMPENHO DE FILTROS CERÂMICOS NA FILTRAÇÃO
DE GASES A ALTAS TEMPERATURAS**

Gracinda Marina Castelo da Silva

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração em Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. José Renato Coury

São Carlos - SP
2008

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

S586df

Silva, Gracinda Marina Castelo da.
Desempenho de filtros cerâmicos na filtração
de gases a altas temperaturas / Gracinda Marina Castelo da
Silva. -- São Carlos : UFSCar, 2008.
158 f.

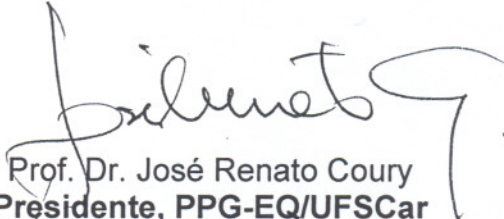
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal de São Carlos,
2008.

1. Filtros cerâmicos. 2. Altas temperaturas. 3.
Permeabilidade. 4. Filtração de gases. 5. Eficiência de
coleta. I. Título.

CDD: 660 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE
GRACINDA MARINA CASTELO DA SILVA, APRESENTADA AO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SÃO CARLOS EM 01 DE SETEMBRO DE 2008.

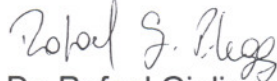
BANCA EXAMINADORA:




Prof. Dr. José Renato Coury
Presidente, PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. Dachamir Hotza
UFSC



Prof. Dr. Rafael Giuliano Pileggi
EPUSP



Prof. Dr. Anselmo Ortega Boschi
DEMa/UFSCar



Profª. Drª. Edinalda Augusta Moreira Correa
UNIFRAN

AGRADECIMENTOS

Ao Deus Pai, eterno criador de todas as coisas.

Aos meus pais, Mario Leandro e Purificação da Glória e irmãos Mario Jorge e Bruna Cristina pelo entusiasmo e confiança em todos os momentos.

Aos meus amados filhos Eduarda e Felipe Castelo Hübner que fazem todo o sentido da minha vida e é por eles que justifico todo o meu esforço.

Ao meu esposo Nélvio José Hübner que sempre esteve presente dando seu apoio, amor, ajuda e paciência em todos os momentos desta jornada. Amo todos vocês.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Renato Coury pela orientação, incentivo, confiança, paciência, oportunidade e conhecimentos adquiridos durante a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Antônio Gonçalves, Prof. Dr.^a Mônica Aguiar e aos funcionários do Departamento de Engenharia Química da UFSCar que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Oscar (Oficina do DEQ) pela ajuda e disposição nos auxílios ocasionais do aparato experimental.

Ao Prof. Dr. Murilo Innocentini e Prof. Dr. Carlos Rambo pela valiosa contribuição durante o desenvolvimento deste trabalho. Pelas discussões e sugestões que contribuíram significativamente para este trabalho.

Aos amigos de laboratório com os quais foram compartilhados conhecimentos e experiências: Vádila Guerra, Simoni Pozza, Edinalda Correa, Marcos Vinícius, Edmundo Valdez, Juliana Steffens, Fábio Arouca, Eduardo Tanabe, Natália Feitosa, Sandra Mara, Wania Christinelli, Juliana Milanez e Daliana Muller.

À CAPES e FAPESP pelo apoio financeiro dado a este trabalho.

RESUMO

A criação de normas rigorosas de emissão e controle de poluentes lançados na atmosfera levou a um crescente interesse em se desenvolver tecnologias para limpeza de gases que permitissem, não somente a remoção eficiente de poluentes, mas também o reaproveitamento energético do processo. Os filtros cerâmicos vêm sendo os meios mais utilizados para separar partículas de aerossóis em correntes gasosas em temperaturas elevadas. As principais características destes filtros são as baixas perdas de carga e alta eficiência de coleta. Este trabalho apresenta resultados experimentais da permeabilidade e da eficiência de filtração, em altas temperaturas em filtros cerâmicos de diferentes estruturas e composições. Foram utilizados para os ensaios filtros de microfibras de quartzo com 0,5 mm de espessura, 7 filtros cerâmicos fibrosos (A1000, B750, B1000, 1A, 2D, 3D e 5A) de 9-12 mm de espessura e 2 filtros cerâmicos (A12 e A13) de 9-10mm de espessura. Para os testes, os filtros tinham formato circular de 5-6 cm de diâmetro e área efetiva de escoamento de 3 cm de diâmetro. Os filtros de microfibras de quartzo tinham porosidade de 0,689 e diâmetro de fibras em torno de 1,1 μ m, os filtros cerâmicos fibrosos porosidade de 0,5 a 0,73 e diâmetro médio de fibras em torno de 5 μ m e os filtros cerâmicos porosidade de 0,62 para a amostra A12 e 0,68 para a amostra A13 e diâmetro médio do poro de 0,33 e 0,67 μ m, respectivamente. Os filtros foram caracterizados quanto à porosidade (ϵ) determinada por porosimetria de Mercúrio (Quantachrome Poremaster) e diâmetro de fibra obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) e determinadas por análise de imagens, utilizando o software Image Proplus for Windows. Os ensaios de permeabilidade foram realizados em ampla faixa de velocidade (0,01 a 1,8 m/s) e de temperatura (ambiente a 700 °C). O equipamento utilizado nos ensaios das constantes de permeabilidade consistia de um soprador, um medidor de vazão, micromanômetro (Furness Controls Ltd. – FCO14), um forno (Maitec) e um controlador de temperatura do tipo PID (Flyever). Para os testes de filtração a altas temperaturas o material particulado utilizado foi o concentrado fosfático com densidade de 2970 kg/m³ e diâmetro mediano de 4,62 μ m. A densidade do material particulado foi determinada por picnometria de hélio (AccuPyc 1330, Micromeritics). O sistema experimental consistia de um gerador de aerossol do tipo leito fluidizado (TSI-3400), um contador de partículas (Hiac/Royco Modelo 5230) e de uma câmara de ensaio inserida em um forno. Foram analisadas partículas em oito faixas granulométricas: 0,75; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 6; 8,5 e 12,5 μ m. Os experimentos de filtração foram realizados em três níveis de temperatura (ambiente, 300 e 700°C) e velocidade de filtração em 0,05m/s. Pelos resultados obtidos observou-se no geral que houve um aumento para a constante de permeabilidade darciana, k_1 à medida que se elevou a temperatura para os filtros cerâmicos. Para todos os filtros estudados os testes de filtração mostraram uma dependência clara entre eficiência de filtro e temperatura de teste: foram obtidas menores eficiências de filtração com o aumento da temperatura do gás. Uma provável expansão térmica da estrutura do filtro ocasionou uma dilatação temporária dos canais porosos para o escoamento do fluido e alterações nas propriedades do gás que alteram a capacidade de remoção do filtro. Com base nos resultados apresentados, conclui-se que os filtros utilizados apresentam características que viabilizam a sua utilização na filtração industrial de gases quentes. A correlação proposta para o filtro de microfibras de quartzo representou bem o comportamento experimental para a queda de pressão e a eficiência de coleta fracionária, respondendo de forma satisfatória as diferentes temperaturas de teste.

ABSTRACT

The creation of rigorous emission and air pollution control standards has led to a growing interest in developing technologies to clean gases that not only remove pollutants efficiently but also recycle the energy produced by the process. Ceramic filters have been the most frequently utilized to separate aerosol particles in gas streams at high temperatures. The principal characteristics of ceramic filters are low pressure drop and high collection efficiency. This study presents the experimental results on the permeability and filtration efficiency for ceramic filters of different structures and compositions at high temperatures. The filters utilized in the trials were: 0.5mm thick quartz microfiber filters, seven ceramic fiber filters (A1000, B750, B1000, 1A, 2D, 3D and 5A) from 9-12 mm thick and two ceramic filters (A12 and A13) from 9-10mm thick. All the filters were circular (5-6cm diameter) and had an effective runoff area 3cm in diameter. The quartz microfiber filters had a porosity of 0.689 with a fiber diameter of around 1.1 μ m; the ceramic fiber filters had a porosity of 0.5 to 0.73 and a mean fiber diameter of around 5 μ m. The ceramic filters had a porosity of 0.62 for the A12 sample and 0.68 for the A13 sample with a mean pore diameter of 0.33 and 0.67 μ m, respectively. The filters were characterized by porosity (ϵ) determined by a mercury intrusion porosimeter (Quantachrome Poremaster) and fiber diameter was captured by a scanning electron microscope (SEM) and determined by image analysis utilizing Image Proplus for Windows software. The permeability trials were performed at room and 700° C temperatures and at velocities of 0.01 to 1.8 m/s. The equipment utilized in the permeability constant trials consisted of a blower, leak detector, micromanometer (Furness Controls Ltd. – FCO14), a furnace (Maitec) and a PID type temperature controller (Flyever). The particulate material utilized in the high temperature filtration tests was concentrated phosphate with a density of 2970 kg/m³ and mean diameter of 4.62 μ m. The density of the particulate material was determined by a helium pycnometer (AccuPyc 1330, Micromeritics). The experimental system consisted of a fluidized bed aerosol generator (TSI-3400), a particle counter (Hiac/Royco Model 5230) and a test chamber inserted in the furnace. Particulates were analyzed in eight granulometric bands: 0.75; 1.5; 2.5; 3.5; 4.5; 6; 8. and 12.5 μ m. The filtration experiments were carried out at three levels of temperature (room, 300 and 700°C) at a filtration velocity of 0.05m/s. For the results obtained, there was an increase in the Darcian permeability constant, k_1 which elevated the temperature for ceramic filters. For all filters studied, the filtration tests demonstrated a clear dependence between filter efficiency and test temperature: lower filtration efficiency was obtained at higher gas temperatures. The probable thermal expansion of the filter structure temporarily dilated the porous channels for fluid runoff and gas property alterations changing the removal capacity of the filter. Based on the results presented, we concluded that the filters utilized in the study are viable for industrial filtration of hot gases. The correlation proposed for the quartz microfiber was a good representation of the experimental behavior of pressure drop and the efficiency of fractional collection and was a satisfactory fit at the different test temperatures.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
SUMÁRIO	iii
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Poluição Atmosférica.....	4
2.2 Filtração a Altas Temperaturas.....	9
2.3 Filtros.....	6
2.3.1 Critérios de seleção de um filtro.....	12
2.4 Escoamento de fluidos em meios porosos.....	14
2.4.1 Meios Porosos.....	14
2.4.2 Fluido.....	14
2.4.3 Permeabilidade de Meios Porosos.....	15
2.4.3.1 Correlações para o cálculo da permeabilidade.....	17
2.4.4 Parâmetro Estrutural – Porosidade.....	20
2.5 Coleta de partículas em um meio filtrante.....	22
2.5.1 Mecanismo difusional.....	23
2.5.2 Mecanismo Inercial.....	23
2.5.3 Mecanismo de interceptação direta.....	24
2.5.4 Mecanismo gravitacional.....	25
2.5.5 Mecanismo de forças eletrostáticas.....	25
2.6 Quantificação dos Mecanismos.....	26
2.7 Eficiência de Coleta do Filtro	31
2.8 Efeito da temperatura e pressão do gás.....	35
2.9 Limpeza do Material Filtrante.....	36
2.9.1 Vibração Mecânica.....	37

2.9.2 Fluxo de ar inverso.....	37
2.9.3 Pulso de gás inverso.....	37
2.10 Trabalhos a altas temperaturas.....	40
3. METODOLOGIA DE PESQUISA.....	43
3.1 Materiais e Equipamentos.....	43
3.1.1 Material Particulado.....	43
3.1.1.1 Sistema de dispersão do aerosol.....	45
3.1.2 Meios Filtrantes.....	46
3.1.2.1 Filtro de microfibra de quartzo.....	46
3.1.2.1.1 Caracterização Física do Filtro de Microfibra de Quartzo.....	47
3.1.2.2 Filtros Cerâmicos Fibrosos A1000, B1000, B750, 1A, 2D, 3D e 5A.....	49
3.1.2.3 Filtro Cerâmico Celular A12 e A13.....	51
3.2 Caracterização Aerodinâmica.....	52
3.2.1 Ensaio de Permeabilidade dos Filtros.....	52
3.2.1.1 Cálculo das constantes de permeabilidade.....	55
3.3 Ensaios de filtração para os filtros de microfibra de quartzo, os filtros cerâmicos fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A e os filtros cerâmicos celular A12 e A13...	56
3.3.1. Contador de Partículas.....	57
3.3.2. Ensaios de Eficiência de Coleta.....	58
3.3.3 Número de Partículas na Entrada do Filtro.....	58
3.3.4. Ensaios Experimentais de Eficiência de Coleta.....	59
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1 Permeabilidades dos Filtros Cerâmicos.....	60
4.1.1 Filtro de Microfibra de Quartzo.....	60
4.1.2 Filtros Cerâmicos Fibrosos.....	63
4.1.2.1 Filtros B750, A1000 e B1000.....	63
4.1.2.2 Filtros 1A, 2D, 3D e 5A.....	68
4.1.3 Filtros Cerâmicos Celulares A12 e A13	73
4.2 Eficiências de coleta dos Filtros Cerâmicos.....	77

4.2.1 Filtro de Microfibra de Quartzo.....	77
4.2.2 Filtros Cerâmicos Fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.....	81
4.2.3 Filtros Cerâmicos Celulares A12 e A13.....	85
4.3 Comparações do desempenho dos filtros.....	87
4.4 Propostas de correlação para previsão da queda de pressão e eficiência de coleta fracionária para o filtro de microfibra de quartzo.....	91
4.4.1 Comparação entre o comportamento experimental e calculado por correlações da literatura da curva de queda de pressão em função de velocidade superficial.....	91
4.4.2 Correlação para a eficiência de coleta fracionária para o filtro de microfibra de quartzo.....	96
5. CONCLUSÕES.....	101
6. SUGESTÕES.....	104
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXO A - Preparação do Filtro de Microfibra de Quartzo para MEV e Análise no Image-Pro Plus.....	115
APÊNDICE A - Dados de Permeabilidade do Filtro de Microfibra de Quartzo.....	118
APÊNDICE B- Dados de Permeabilidade dos Filtros Cerâmicos Fibrosos B750, B1000 e A1000.....	122
APÊNDICE C - Dados de Permeabilidade dos Filtros Cerâmicos Fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.....	131
APÊNDICE D - Dados de Permeabilidade dos Filtros Cerâmicos Celular A12 e A13.....	142

APÊNDICE E - Dados de Filtração do Filtro de Microfibra de Quartzo.....	149
APÊNDICE F - Dados de Filtração dos Filtros Cerâmicos Fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.....	151
APÊNDICE G - Dados de Filtração dos Filtros Cerâmicos Celulares A12 e A13.....	156

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Faixa de temperatura de operação dos equipamentos na limpeza de gases quentes (THAMBIMUTHU, 1993).....	8
Figura 2.2 Faixa do tamanho de partículas coletadas pelos equipamentos de limpeza de gases quentes (THAMBIMUTHU, 1993).....	8
Figura 2.3 Mecanismo de coleta por difusão (HINDS, 1998).....	23
Figura 2.4 Mecanismo de coleta de impactação inercial (HINDS, 1998).....	24
Figura 2.5 Mecanismo de coleta por interceptação (HINDS, 1998).....	24
Figura 2.6 Mecanismo de coleta gravitacional.....	25
Figura 2.7 Mecanismo eletrostático de coleta (adaptado COURRY,1986).....	25
Figura 2.8 Interação dos mecanismos de coleta e eficiência resultante dos mesmos (HINDS, 1998).....	31
Figura 2.9 Filtração em leito fixo.....	34
Figura 2.10 Diagrama esquemático de condicionamento do filtro.....	39
Figura 3.1 Imagem do concentrado fosfático obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.....	44
Figura 3.2 Distribuição granulométrica das partículas do concentrado fosfático obtida no contador óptico de partículas Hiac/Hoyco no DEQ-UFSCar.....	45
Figura 3.3 Gerador de pó do tipo leito fluidizado de pequena escala modelo TSI 3400.....	46
Figura 3.4 Vista superior do filtro de microfibras de quartzo a) com ampliação 1000 vezes b) com ampliação de 5000 vezes.....	48
Figura 3.5 Microestrutura dos filtros cerâmicos fibrosos: a),b) não sinterizados; c), d) 73% e), f) 65%, g), h) 50%.....	50
Figura 3.6 Microestrutura do filtro cerâmico com ampliação de 400 vezes.....	51
Figura 3.7 Esquema do sistema experimental para avaliação da permeabilidade dos filtros cerâmicos.....	53
Figura 3.8 Fotografia do permeâmetro acoplado à manta de aquecimento.....	53
Figura 3.9 Fotografia e configurações do porta amostra aonde era mantido fixo o meio filtrante utilizado nos experimentos. Valores da unidade da figura em milímetros.....	54
Figura 3.10 Esquema do sistema experimental para avaliação da filtração dos	

filtros utilizados nos experimentos.....	56
Figura 3.11 Contador óptico de partículas Hiac/Royco modelo 5230.....	58
Figura 4.1 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro de microfibras de quartzo.....	61
Figura 4.2 Permeabilidade Darciana em função da temperatura para filtro de microfibras de quartzo.....	62
Figura 4.3 Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para o filtro de microfibras de quartzo.....	63
Figura 4.4 Curvas da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para o filtro fibroso B750.....	64
Figura 4.5 Curvas da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para o filtro fibroso A1000.....	64
Figura 4.6 Curvas da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para o filtro fibroso B1000.....	65
Figura 4.7 Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos com diferentes porosidades.....	66
Figura 4.8 Comparação da permeabilidade não- Darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos com diferentes porosidades.....	67
Figura 4.9 Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para os filtros A1000, B1000 e B750.....	68
Figura 4.10 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 1A.....	69
Figura 4.11 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 2D.....	69
Figura 4.12 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 3D.....	70
Figura 4.13 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 5A.....	70
Figura 4.14 Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.....	71
Figura 4.15 Comparação da permeabilidade não-Darciana (k_2) em função da	

temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.....	71
Figura 4.16 Relação da permeabilidade Darciana (k_1) com a porosidade dos filtros: 1A, 2D, 3D e 5A.....	72
Figura 4.17. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para os filtros: 1A; 2D; 3D e 5A.....	73
Figura 4.18 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro cerâmico celular Amostra 12.....	74
Figura 4.19 Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro cerâmico celular Amostra 13.....	74
Figura 4.20 Comparação da Permeabilidade: a) darciana (k_1) e b) não-darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros cerâmicos celulares A12 e A13 com diferentes porosidades.....	75
Figura 4.21 Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para os filtros: A12 e A13.....	76
Figura 4.22. Eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro de microfibras de quartzo.....	77
Figura 4.23. Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro de microfibras de quartzo nos primeiros 5 minutos de filtração.....	78
Figura 4.24. Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro de microfibras de quartzo nos 20 minutos de filtração.....	79
Figura 4.25. Fotografia do filtro de microfibras de quartzo após ensaio de filtração (duração de 60 min).....	80
Figura 4.26 Eficiência de coleta global em função do tempo de filtração para os filtros cerâmicos fibrosos para as diferentes temperaturas com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) 1A; b) 2D; c) 3D; d) 5A.	82
Figura 4.27 Relação da eficiência de coleta global (E_G) na T_{ambiente} e na $T_{700}^{\circ}\text{C}$ com a porosidade dos filtros: 1A, 2D, 3D e 5A.....	82
Figura 4.28 Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para os filtros cerâmicos fibrosos nas diferentes temperaturas nos 5	

minutos de filtração trabalhando com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) 1A; b) 2D; c) 3D; d) 5A.	83
Figura 4.29 Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para os filtros cerâmicos fibrosos nas diferentes temperaturas nos 20 minutos de filtração trabalhando com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) 1A; b) 2D; c) 3D; d) 5A.	84
Figura 4.30 Eficiência de coleta global em função do tempo de filtração para os filtros cerâmicos celulares para as diferentes temperaturas com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) A12 e b)A13.....	86
Figura 4.31 (a) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 5 minutos de filtração. (b) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 20 minutos de filtração. Resultados nas $T_{20^{\circ}\text{C}}$ e $T_{700^{\circ}\text{C}}$, com uma velocidade de filtração de 5 cm/s para o filtro cerâmico celular A12.....	87
Figura 4.32 (a) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 5 minutos de filtração. (b) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 20 minutos de filtração. Resultados nas $T_{20^{\circ}\text{C}}$ e $T_{700^{\circ}\text{C}}$, com uma velocidade de filtração de 5 cm/s para o filtro cerâmico celular A13.....	87
Figura 4.33 Comparação da eficiência de coleta fracionária para os diferentes filtros cerâmicos estudados. a) T_{ambiente} ; b) $T_{700^{\circ}\text{C}}$	88
Figura 4.34 Valores das constantes de permeabilidade reunidas na literatura para vários materiais porosos na filtração de aerossóis comparados com os dados obtidos para os filtros cerâmicos na T_{amb} (INNOCENTINI <i>et al.</i> , 2005).....	90
Figura 4.35 Comparação entre os dados experimentais e as curvas previstas pelos modelos da literatura para o filtro de microfibras de quartzo, utilizando a porosidade total, diâmetro de fibra e viscosidade do leite nas temperaturas de testes.....	94
Figura 4.36 Comparação entre os dados experimentais e as curvas previstas pela equação proposta (4.2) para o filtro de microfibras de quartzo nas diferentes temperaturas de teste.....	95
Figura 4.37 Comparação dos dados experimentais de k_1 com os obtidos pela correlação proposta (Eq. 4.2) para o filtro de fibra de quartzo nas diferentes	

temperaturas.....	96
Figura 4.38 Comparação entre o modelo previsto pela Equação 4.3 e as curvas experimentais da eficiência de coleta fracionária para o filtro de microfibra de quartzo nas três temperaturas investigadas.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Padrões nacionais de qualidade do ar. Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90.....	5
Tabela 2.2 Principais aplicações industriais, condições de operação e funções de sistemas de limpeza de gases quentes. (SEVILLE, 1993).....	7
Tabela 2.3 Comparação entre os meios filtrantes usados na filtração a altas temperaturas (adaptado de PEUKERT, 1998).....	10
Tabela 2.4 Vantagens e desvantagens de vários tipos de filtros fibrosos (WILLEKE E BARON, 1993)	11
Tabela 2.5 Parâmetros de projeto utilizados mais frequentemente na filtração de gases. (Adaptado de MATTESON, 1987).....	13
Tabela 2.6 Efeito da temperatura e pressão sobre a coleta de partículas, para os diferentes mecanismos. (CHEUNG, 1989).....	36
Tabela 3.1 Composição química do material particulado usado na geração do aerossol (INNOCENTINI, 1997).....	43
Tabela 3.2 Análise granulométrica do material particulado.....	45
Tabela 3.3 Características do Filtro de microfibras de quartzo (EQR8X10IN), fornecido pelo fabricante. (Energética).....	47
Tabela 3.4. Porosidade, diâmetro médio da fibra e espessura do filtro de microfibras de quartzo estudados.....	49
Tabela 3.5 Porosidade, diâmetro médio da fibra e espessura dos filtros cerâmicos fibrosos estudados.....	49
Tabela 3.6 Porosidade, diâmetro médio do poro e espessura dos filtros cerâmicos celulares estudados.....	52
Tabela 3.7 Condições de operação dos ensaios de filtração.....	56
Tabela 4.1 Valores da constante de permeabilidade Darciana, k_1 para os meios filtrantes estudados nas diferentes temperaturas de teste.....	89
Tabela 4.2 Valores da constante de permeabilidade não-Darciana, k_2 para os meios filtrantes estudados nas diferentes temperaturas de teste.....	89
Tabela 4.3 Valores dos desvios médios máximos das correlações testadas.....	92
Tabela 4.4 Máximo dos desvios da correlação proposta (Eq. 4.2).....	93

LISTA DE SÍMBOLOS

A – área do leito	[L ²]
A _S – parâmetro de Happel	[-]
C ₀ – concentração mássica de partículas na entrada do filtro	[ML ⁻³]
C – concentração mássica de partículas na saída do filtro	[ML ⁻³]
D – coeficiente de difusão das partículas	[L ² t ⁻¹]
d _C – diâmetro médio dos grânulos que formam o leito	[L]
d _f - diâmetro da fibra	[L]
d _p – diâmetro da partícula	[L]
d _{poro} – diâmetro do poro	[L]
E _G – eficiência global de coleta de um filtro	[-]
E _i – eficiência experimental de coleta de partículas com diâmetro d _{pi}	[-]
F _S – fator de escorregamento de Cunningham	[-]
g – aceleração da gravidade	[Lt ⁻²]
K _B – constante de Boltzmann	[ML ² t ⁻² T ⁻¹]
Ku - fator hidrodinâmico de Kuwabara	[-]
k ₁ – constante de permeabilidade Darcyana	[L ²]
k ₂ – constante de permeabilidade não-Darcyana	[L]
L – altura do leito	[L]
m – massa	[M]
M _e – massa de partículas na entrada do filtro	[M]
M _S – massa de partículas na saída do filtro	[M]
m _{susp} – massa da suspensão depositada	[M]
N _C – número de partículas coletadas	[-]
N _{e,i} – número de partículas com diâmetro d _{pi} na entrada do filtro	[-]
N _{Pe} – número de Peclet	[-]
N _R – parâmetro relativo a tamanho	[-]
N _{Re} – número de Reynolds	[-]
N _{S,i} – número de partículas com diâmetro d _{pi} na saída do filtro	[-]
N _{St} – número de Stokes	[-]
N _{St+} – número de Stokes modificado	[-]
N _{Steff} – número de Stokes efetivo	[-]

N_T – número de partículas que se aproxima do coletor	[-]
P – pressão absoluta	[$ML^{-1}T^{-2}$]
P_e – Penetração	[-]
R – taxa de coleta por unidade de massa	[$t^{-1}M^{-1}$]
r – taxa de coleta de partículas	[t^{-1}]
T – temperatura do fluido	[T]
t – tempo de filtração	[t^{-1}]
V – volume total de coletores do meio	[L^3]
v – velocidade superficial do fluido	[Lt^{-1}]
v_t – velocidade terminal da partícula	[Lt^{-1}]
γ - probabilidade de adesão	[-]
ε - porosidade do filtro	[-]
μ - viscosidade do fluido	[$ML^{-1}t^{-1}$]
ρ_{geom} – densidade geométrica do filtro	[ML^{-3}]
ρ_C – densidade do coletor	[ML^{-3}]
ρ_g – densidade do gás	[ML^{-3}]
ρ_p – densidade da partícula	[ML^{-3}]
ρ_s é a densidade do sólido	[ML^{-3}]
ρ_{susp} – densidade da suspensão	[ML^{-3}]
η_D – eficiência de coleta segundo mecanismo difusional	[-]
η_{ID} – eficiência de coleta segundo mecanismo de interceptação direta	[-]
η_E – eficiência de coleta segundo mecanismo eletroforético	[-]
η_G – eficiência de coleta segundo mecanismo gravitacional	[-]
η_I – eficiência de coleta segundo mecanismo inercial	[-]
η_T – eficiência global de coleta de um único elemento coletor	[-]
ΔP – queda de pressão no filtro	[$ML^{-1}t^{-2}$]

1. INTRODUÇÃO

A poluição do material particulado e o desperdício industrial ocasionaram a necessidade de controlar e limitar a emissão dos poluentes atmosféricos. A industrialização tem fornecido para a humanidade muitos benefícios materiais e sociais. Entretanto a emissão de material particulado merece muita atenção, visto que tipos diferentes de resíduos gasosos e ou partículas tóxicas na atmosfera provocam prejuízos tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente (RUIZ, *et al.*, 2000).

Em muitos processos industriais são gerados gases a temperaturas e pressões elevadas, que contem partículas pequenas e componentes gasosos nocivos ao meio ambiente. Visando adequar-se às normas vigentes na emissão de poluentes a atmosfera, o desenvolvimento de processos mais eficientes e integrados em termos de energia e tecnologia de processo vem acontecendo continuamente (PEUKERT, 1998).

Aplicações de filtração de gases quentes incluem processos como combustão e gaseificação de carvão, incineração, recuperação catalítica, indústria de refino, indústria química e petroquímica e a geração de energia termelétrica (INNOCENTINNI, 1997; FERNANDO e CHUNG, 2002; FREITAS, 2003).

Uma grande gama de tecnologias existe atualmente para a remoção de material particulado. Em altas temperaturas, pequenas partículas e frequentemente componentes gasosos tóxicos restringem as opções disponíveis. Para que se obtenha uma alta eficiência de coleta do pó a temperaturas elevadas (eficiências maiores do que 99%) de partículas pequenas com diâmetro abaixo de 1 μ m, tem-se como escolha o uso de filtros (DAVIES *apud* AGRANOVSKI E SHAPIRO, 2001).

A função primária dos filtros de gases quentes em muitas aplicações mencionadas é remover os materiais particulados finos de gases de exaustão que se encontra em temperaturas elevadas. Os meios filtrantes usados na filtração com gases quentes podem ser divididos dentro de dois grupos gerais, ou seja, meios fibrosos e granulares (PEUKERT, 1998; FERNANDO e CHUNG, 2002).

Em qualquer processo de filtração, a eficiência de coleta de um material particulado está diretamente vinculada ao meio filtrante escolhido para o processo. Um filtro adequado para trabalhos com gases quentes deve apresentar as características tais como: resistência a choques mecânicos e térmicos, ser quimicamente inerte ao gás e material filtrado, permitir o escoamento pela sua estrutura com o menor consumo de energia e

principalmente mantendo uma alta eficiência de coleta (ANTUNES, 1997).

Os filtros cerâmicos apresentam-se como meios promissores na limpeza de material particulado em correntes gasosas a temperaturas elevadas. Dentre as principais características destes filtros, têm-se as baixas perdas de carga e alta eficiência de coleta, visto a capacidade de resistir a temperaturas em torno de 1000°C (INNOCENTINI, 1997; FREITAS *et al.*, 2006). Estes parâmetros dependem da estrutura do filtro (porosidade, diâmetro de fibra), das condições de operação (velocidade de filtração, temperatura de trabalho) e das características do gás a ser limpo (densidade, tamanho de partícula). Para tanto é de fundamental importância conhecer o desempenho do filtro através de sua permeabilidade, da eficiência de remoção de impurezas e da resistência mecânica.

Desta forma o trabalho descrito nesta tese foi dividido em duas etapas distintas. A avaliação do desempenho dos filtros de microfibras de quartzo e dos filtros cerâmicos na filtração de gases quentes, sendo importante frisar que o filtro de microfibras de quartzo apresenta potencial de atuação como amostrador de ar enquanto que os filtros cerâmicos apresentam potencial para atuarem como filtros a altas temperaturas.

A primeira fase foi a de avaliar o filtro de microfibras de quartzo fornecido pela Energética para testes quanto a sua caracterização física, caracterização aerodinâmica e coleta do material particulado em trabalhos com altas temperaturas. E dentro do contexto apresentado, discutir a utilização de alguns modelos da literatura para estimar a permeabilidade e eficiência de coleta fracionária do filtro de microfibras de quartzo. Os dados obtidos permitiram uma ampla análise das correlações existentes, propondo para o filtro de microfibras de quartzo novas correlações que representam de forma adequada a permeabilidade e a eficiência de coleta fracionária as diferentes temperaturas de teste.

Os filtros de quartzo por muito tempo foram utilizados apenas na determinação de conteúdo de carbono por análise térmica. Entretanto, existem atributos que fazem dos filtros de quartzo satisfatórios para trabalhar com filtração em ambientes hostis, que incluem a sua estabilidade térmica, alta eficiência de coleta de partículas e baixo custo (HINDS, 1998, KIRCHSTETTER *et al.*, 2001). Apesar disso, não existem trabalhos na literatura utilizando filtros de microfibras de quartzo na filtração de aerossóis em altas temperaturas.

Dando continuidade ao desenvolvimento desta tese, a segunda fase foi verificar o desempenho de novos materiais filtrantes na filtração de gases a altas temperaturas. Isso tudo foi possível devido a uma parceria com o Prof. Dr. Dachamir Hotza e o Prof. Dr. Carlos Rambo do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC e o Prof. Dr. Rafael Pileggi do Departamento de Engenharia Civil da USP e o Prof. Dr. Murilo

Daniel Innocentini do Curso de Engenharia Química da UNAERP, onde os mesmos forneceram os meios cerâmicos (meio fibroso e meio celular, respectivamente) para subsequente avaliação do seu desempenho em trabalhos a altas temperaturas. Os mesmos viabilizaram as amostras dos materiais filtrantes, afim de que o Departamento de Engenharia Química da UFSCar as analisasse quanto a sua caracterização aerodinâmica e eficiência de coleta.

Sabe-se que tecnologias de proteção ambiental movimentaram no mercado mundial cerca de US\$ 450 bilhões em 1996. Países como Alemanha, Inglaterra e Estados Unidos têm investido maciçamente em métodos de limpeza de gases que permitam não somente a remoção de poluentes, mas também o reaproveitamento energético do processo. No Brasil existe uma defasagem tecnológica no setor do desenvolvimento de novos materiais, com a perda para empresas estrangeiras do segundo maior mercado ambiental da América Latina, com um potencial de crescimento estimado entre 5 a 7% nos próximos anos (INNOCENTINNI, 1997). Procurando sanar essa defasagem tecnológica à confecção desses filtros cerâmicos apresenta-se como um novo tipo de estrutura para atuar na filtração de aerossóis e maiores estudos se faz necessários para verificar a viabilidade de sua utilização em processos industriais.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho consiste, dentro do contexto apresentado, basicamente na investigação da permeabilidade dos diferentes meios filtrantes e a eficiência de coleta do material particulado em relação ao seu comportamento às variações de temperatura testadas. Buscou-se de essa forma obter valores que comprovem a viabilidade das diferentes estruturas cerâmicas para o uso industrial.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresentada a seguir aborda os assuntos relacionados ao objetivo deste trabalho, incluindo um estudo em torno das características do elemento filtrante utilizado para separar o material particulado do efluente gasoso a temperaturas elevadas.

2.1 Poluição Atmosférica

Desde os tempos mais remotos, o homem vem se tornando cada vez mais consciente do perigo que representa uma atmosfera poluída. Existem registros de que essa preocupação motivou várias disposições legislativas em alguns países, como a França, onde em 1382, Carlos VI proibiu a emissão de gases fétidos, ou a Inglaterra, onde existia, já no século XVII, uma disposição que proibia acender fogo durante as sessões do parlamento de Westminster. A partir da explosão industrial e urbana do século XIX, a poluição atmosférica aumentou consideravelmente e de tal forma que as relações entre o homem e seu meio ambiente tornaram-se alteradas (BRAUN *et al.*, 2003).

Atualmente, apesar de alguns autores considerarem que mesmo as investigações científicas altamente complexas ainda não são avançadas o suficiente para fornecerem conclusões irrefutáveis acerca de como controlar e retroceder a poluição atmosférica pode-se verificar que muitas disposições adotadas em vários países estão sendo capazes de, ao menos, diminuir a taxa de aumento da concentração dos principais poluentes. É patente, portanto, que a pesquisa científica tem contribuído de maneira inestimável para o estudo e a preservação do meio ambiente.

As partículas em suspensão desempenham um importante papel no balanço de energia da Terra. Partículas de poeira, material particulado gerado na exaustão de máquinas movidas à diesel e, também, os aerossóis formados durante a queima de biomassa funcionam como absorventes da radiação solar incidente e como suporte adsorvente para compostos químicos.

Entretanto os aumentos consideráveis destas emissões na atmosfera causam conseqüências diretamente na saúde pública e vida das pessoas, modificando todo um habitat. Considerando-se que, diariamente, 12 m³ (15 kg) de ar são inalados pela maioria dos indivíduos, é de se esperar que a qualidade da respiração afete o funcionamento do metabolismo celular do organismo e, portanto, a saúde do indivíduo. Os poluentes do ar

entram no organismo dos seres humanos e de outros seres vivos pelo sistema respiratório, causando grandes desordens não apenas nesse sistema, pois passam dos pulmões para o sistema circulatório, afetando outras funções fisiológicas.

O material particulado em suspensão se destaca como um dos mais importantes parâmetros em estudos de poluição atmosférica devido aos diversos impactos que ele causa à saúde humana e ao meio ambiente (KOUIMTZIS E SAMARA, 1995).

Partículas mais grossas (partículas com diâmetro aerodinâmico maior do que 10 μ m) ficam retidas no nariz e na garganta, provocando incômodo e irritação, além de facilitar que doenças como a gripe, se instalem no organismo. Poeiras finas e superfinas (partículas com diâmetro aerodinâmico menor do que 10 μ m e menores do que 2,5 μ m respectivamente) podem causar danos às partes internas do aparelho respiratório, carregando partículas e outros poluentes para os alvéolos pulmonares e provocando efeitos mais severos do que os causados pelos poluentes de forma isolada. Caso as pessoas permaneçam em locais muito poluídos por material particulado, ficam mais vulneráveis a uma crise aguda de doenças respiratórias.

O material particulado também pode agregar-se a outras substâncias, como as dioxinas, que causam câncer. Em muitos casos, são as pessoas mais velhas e as crianças que mais sofrem com a baixa qualidade do ar. Para o tratamento dessas doenças, o sistema público de saúde é mais demandado, gerando a necessidade de mais gastos (pagos por todos, por meio dos impostos) que usados em outras áreas públicas poderiam melhorar a vida de todos.

Atualmente existem legislações rigorosas e todos os meios poluidores devem se adaptar aos novos limites de emissão de gases nocivos à saúde. Consumidor consciente serve de estímulo para empresas adotarem práticas que não agredam ao meio ambiente. Critérios rigorosos para conter o avanço da emissão de gases poluentes foram estabelecidos e alguns dos padrões de emissão de poluentes estão apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Padrões nacionais de qualidade do ar. Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90.

Poluentes	Tempo Amostragem	Padrão Primário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão Secundário ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas totais em suspensão	24 horas ¹	240	150
	MGA ²	80	60
Partículas inaláveis	24 horas ¹	150	150
	MAA ³	50	50

Extraído de: Relatório de qualidade do ar do Estado de São Paulo, 2001. SP: CETESB, 2002.

1. Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.
2. Média geométrica anual.
3. Média aritmética anual.

De acordo com especialistas, o tipo de poluição limitada pelo CONAMA afeta a todos igualmente, pois provoca danos à saúde mesmo nas pessoas que residem distante das regiões industriais, visto que os gases atingem outras localidades. Há um importante papel para o consumidor consciente que pode indagar das empresas sobre o cumprimento das resoluções do CONAMA e mesmo sobre a superação dos limites colocados, desta forma criando um incentivo para que as empresas invistam nessa direção.

2.2 Filtração a Altas Temperaturas

A Filtração de gases a altas temperaturas é considerada um dos mais promissores recursos no desenvolvimento da tecnologia de coleta de partículas nos últimos anos, visto que a limpeza de gases a altas temperaturas é de grande importância não só por motivos ambientais como também econômicos. As necessidades em longo prazo de sistemas de geração de energia dirigiram este desenvolvimento, mas o foco é voltado agora cada vez mais para a indústria química e de processo (AL-OTOOM, 2005).

A diversidade dessas emissões levou os pesquisadores a procurar soluções práticas e métodos diferentes para a remoção dos materiais não desejados. Alguns dos tipos de aplicações industriais de filtração de gases quentes e o objetivo da limpeza desses gases são apresentados na Tabela 2.2.

A partir da crise do petróleo em 1970, os processos para geração de energia elétrica passaram a depender da limpeza dos gases provenientes da queima do carvão para evitar a corrosão de turbinas pelos subprodutos resultantes da combustão. Com isso era necessário fazer a limpeza dos gases sem reduzir a temperatura deles, visto que ocasionaria em uma perda do potencial energético. Os gases quentes atuavam como força motriz de turbinas geradoras de eletricidade, desde que limpos em temperaturas em torno de 800°C (INNOCENTINI, 1997). Por volta dos anos 90, despertou-se o interesse na limpeza dos gases com aerossóis, em temperaturas elevadas, provenientes de processos físicos e químicos, porque além de causar desgastes em equipamentos, os aerossóis são uns desperdícios de matéria prima ou produto (FREITAS *et al.*, 2004).

Para caracterizar um processo de filtração de gases quentes (HGF) é necessário que ocorra a remoção de particulados presentes em um efluente gasoso em temperaturas acima de 250°C (WITHERS, *apud* FREITAS *et al.*, 2004).

Na limpeza de gases quentes existem vários equipamentos disponíveis na remoção do material particulado, a sua escolha deve levar em conta a resistência estrutural, a

faixa de trabalho e a estabilidade de operação. Trabalhos que envolvem ambientes hostis como altas temperaturas as opções disponíveis ficam mais restritas.

Tabela 2.2. Principais aplicações industriais, condições de operação e funções de sistemas de limpeza de gases quentes. (SEVILLE, 1997).

Aplicação	Operação (T e P)	Ambiente gasoso	Função
Geração termelétrica			
• Combustão pressurizada em leito fluidizado	800°C, 10 bar	Oxidante com álcalis	• Proteção de turbinas • Atender limites de emissão
• Ciclo combinado de gaseificação integrado	600 a 800°C 10 a 30 bar	Redutor, com álcalis e H ₂ S	• Proteção de turbinas • Atender limites de emissão • Proteger o leito de compostos sulfúreos
• Convencional	<700°C, 1 bar	Oxidante	• Atender limites de emissão, com baixo ΔP
Processos Químicos			
• Refino de metais • Calcinação/secagem • Craqueamento catalítico • Recuperação de metais preciosos	300 a 750°C 1 a 3 bar	Variado, porém severo	• Ajudar na recuperação do produto • Reduzir emissão de poluentes • Recuperar a energia
Incineração			
• Resíduos tóxicos • Lixo urbano • Alto-fornos	até 1000°C 1 bar	Oxidante, contendo espécies químicas reativas	• Reduzir emissão de poluentes • Melhorar o processo de incineração • Proteger equipamentos

As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam o desempenho comparativo dos equipamentos disponíveis para a limpeza de gases e suas condições de operação (THAMBIMUTHU, 1993). Como exemplo, os filtros manga e os lavadores exigem o resfriamento da corrente gasosa inviabilizando a recuperação da energia. O uso de ciclones e precipitadores tem-se tornado menos comum devido às normas de emissão de particulados. Todavia os filtros cerâmicos têm-se como melhor opção de escolha, a sua utilização tem sido bastante citada na literatura (REIJNEN E BRAKEL, 1984) como uma das melhores alternativas disponíveis para a limpeza de gases e tem aumentado bastante nos últimos anos. Devido as excelentes

propriedades de filtração e o baixo custo de fabricação e manutenção, além da característica de resistir a temperaturas elevadas e extrema eficiência de coleta (SEVILLE, 1998, INNOCENTINI, 1997).

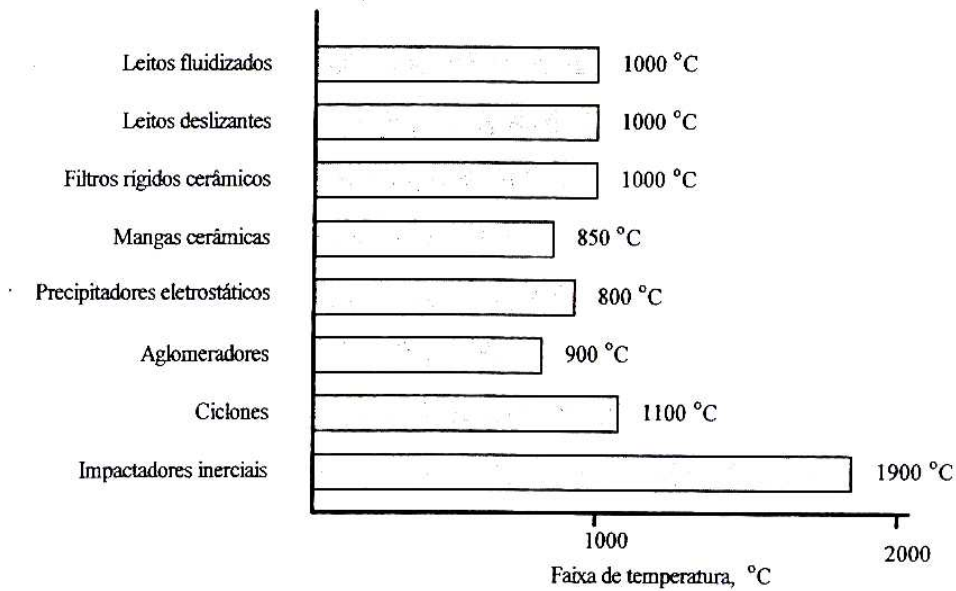


Figura 2.1. Faixa de temperatura de operação dos equipamentos na limpeza de gases quentes (THAMBIMUTHU, 1993).

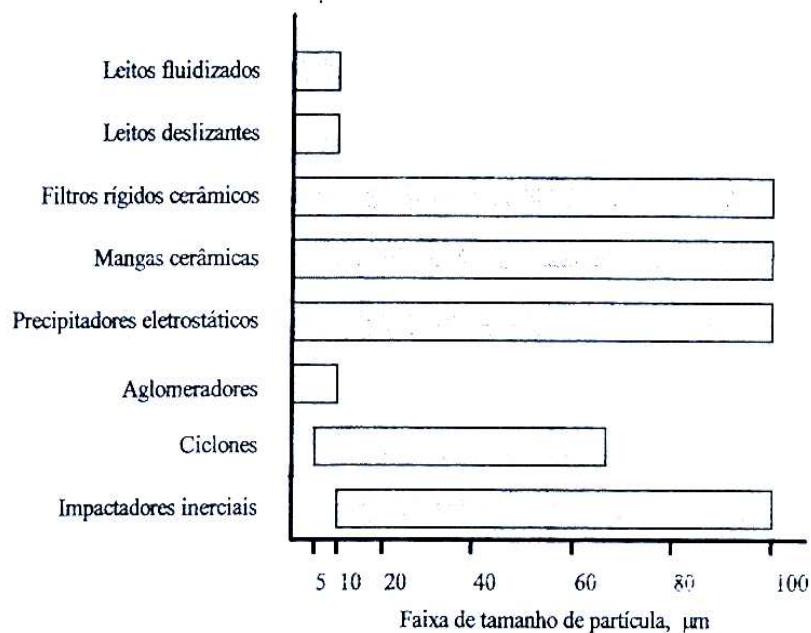


Figura 2.2 Faixa do tamanho de partículas coletadas pelos equipamentos de limpeza de gases quentes (THAMBIMUTHU, 1993).

2.3 Filtros

Durantes os últimos 15 anos foram realizados avanços tecnológicos significantes com respeito ao desenvolvimento, manufatura, avaliação do material, análise do desempenho e viabilidade dos elementos filtrantes tanto em escala piloto como em testes de plantas como, por exemplo, a de queima de carvão. As interações complexas que envolvem todo o processo como a composição do gás, a pressão e a temperatura de operação do sistema, as cinzas ou chamuscas do material particulado, como também os vários materiais de meios porosos devem ser avaliados. Porém, esforços fundamentais permanecem empreendidos e amplia o conhecimento no projeto da geometria dos filtros, corrosão de matérias-primas, componentes e sistemas mecânicos que asseguram o processo da vida operacional (AL-OTOOM, 2005).

Recentemente os filtros cerâmicos apresentam-se como a melhor alternativa na limpeza de gases quentes sendo responsável por mais de 80% do espaço dedicado na literatura (FREITAS *et al.*, 2004). As excelentes propriedades de filtração e o baixo custo de fabricação e manutenção, além da capacidade de resistir a temperaturas superiores a 1000°C e filtrando com extrema eficiência, apresentam como a opção preferida na maioria das aplicações industriais (ALVIN, 1996, INNOCENTINI, 1997, SEVILLE 1997, PEUKERT, 1998).

O uso de filtros cerâmicos apresenta grande aplicação nos diversos setores industriais, principalmente em processos para refino e purificação de metais fundidos, filtração de gases quentes, combustão catalítica, recuperação de vapor e no reaproveitamento de energia solar. O material utilizado neste caso deve ser refratário, permeável, resistente ao choque térmico e eficiente quanto à retenção de impurezas (GIBSON E ASHBY, 1997, FERNANDO *et. al*, 2002,).

Os principais critérios de avaliação para os filtros cerâmicos são a permeabilidade, a eficiência na retenção de impurezas e a resistência mecânica.

Os meios porosos rígidos usados na filtração com gases quentes podem ser divididos dentro de três grupos gerais, ou seja, meios fibrosos, granulares e celulares, classificados em função de sua estrutura como compostos de grânulos ou fibras. (PEUKERT, 1998, FERNANDO E CHUNG, 2002). A Tabela 2.3 apresenta algumas comparações dos meios cerâmicos fibrosos e granulares.

Os filtros cerâmicos granulares são feitos de grânulos de alumina, carbetto de silícios, aluminossilicatos, sílica, mulita. Os grânulos são ligados à base de silicatos e a

natureza destas ligações determina as condições de resistência do filtro. Os filtros granulares apresentam-se como um conjunto de grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou aleatoriamente, e representam a grande maioria dos meios porosos. O tamanho dos poros pode variar de 20 a 1000 μ m. Apresentam porosidades variando de 30 a 60%, resistindo a altas temperaturas com suficiente resistência mecânica, entretanto uma baixa permeabilidade comparada aos filtros fibrosos (INNOCENTINI, 1997, DITTLER E UMHAUER, 2001, LATELLA, *et al.*, 2006). O tamanho dos grânulos é maior do que os diâmetros das fibras, \sim 5 μ m, entretanto as eficiências de um único coletor são menores nos filtros granulares comparadas aos meios fibrosos (PEUKERT, 1998).

Tabela 2.3. Comparação entre os meios filtrantes usados na filtração a altas temperaturas (adaptado de PEUKERT, 1998)

Propriedade	Meio Granular	Meio Fibroso
Densidade	Alta	Baixa
Porosidade	30-60%	60-90%
Permeabilidade	Baixa	Alta
Temperatura	>1000°C	1000°C
Queda de Pressão	>50mbar	20-30 mbar
Eficiência de Coleta	Alta (>99,5%)	Alta (>99,5%)

Os filtros cerâmicos fibrosos em contrapartida consistem de um emaranhado de fibras organizadas de uma forma que a maioria é perpendicular à direção e corrente de ar e apresentam uma porosidade que varia de 0,6 a 0,9. As fibras, dependendo da eficiência desejada, podem ter diâmetros que variam de 0,1 a 100 μ m. Têm a vantagem de proporcionar uma baixa queda de pressão em comparação com os meios granulares, obtendo uma alta capacidade de retenção do material particulado para trabalhos com altas temperaturas. Possuem, contudo a desvantagem em relação aos filtros granulares de uma baixa resistência mecânica.

Dentre os mais utilizados desta classe são os filtros de fibra de vidro que suportam temperaturas de até 500°C e os de fibra de quartzo que, quando devidamente projetados, podem suportar temperaturas de até 800°C (LEE E RAMAMURTHI, 1993). Filtros fibrosos são amplamente usados em muitas aplicações como indústrias nuclear, farmacêutica, alimentos e de semicondutores. Na Tabela 2.4 são apresentadas algumas vantagens e desvantagens do uso de filtros fibrosos.

Tabela 2.4. Vantagens e desvantagens de vários tipos de filtros fibrosos (WILLEKE E BARON, 1993).

Tipos de Filtros	Aplicações	Vantagens	Limitações
Filtros fibrosos (geral)	Amostragem da qualidade do ar	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa queda de pressão operando em amostragens de grandes volumes. • Baixo custo. • Alta capacidade de retenção do material particulado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa eficiência de coleta para partículas submicrométricas. • Coleta das partículas acontece ao longo da profundidade do filtro.
Filtros de vidro de Borosilicato	Largo alcance em amostragens de ar. Usado sem pasta orgânica	<ul style="list-style-type: none"> • Resistência a temperaturas 500°C. • Quimicamente resistente até certo ponto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formação de sulfato devido à alcalinidade das fibras. • Pode ocorrer a formação de vapor da água, devendo ser equilibrada adequadamente.
Filtros de quartzo	Amostragens de ar para análises químicas de partículas iônicas em cromatografia, absorção atômica, análises de carbono, análise PHA, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa captação de umidade. • Estável a temperaturas até 800°C. • Baixos níveis de traços de contaminação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Friável • Formação de nitratos pode ser observada.

Os filtros de fibra de vidro, quartzo e HEPA (High Efficiency Particulate Aerosol) foram projetados para remover as partículas na corrente de gás com eficiências em torno de 99,97% (WILLEKE e BARON, 1993, SONG *et al.*, 2006). Os filtros de fibra de vidro apresentam uma eficiência de filtração superior a 99% para partículas maiores de 0,3µm. Os filtros de fibra de quartzo, entretanto são mais duráveis que os filtros de fibra de vidro, erros devidos a perdas de massa do filtro já foram registradas em aproximadamente 3µg/m³ com manuseio cuidadoso. Para baixas concentrações de pó, os filtros fibrosos são mais econômicos, para se alcançar altas eficiências de coleta de partículas submicrométricas. A velocidade do ar nos filtros para uma alta eficiência é normalmente bastante baixa, em torno de 0,05m/s (5 cm/s). Em filtros fibrosos, ambos a eficiência e a queda de pressão aumentam como acúmulo das partículas coletadas no filtro. Inicialmente, isto é benéfico, ou seja, a qualidade de filtro melhora. Mas eventualmente, a queda de pressão fica excessiva provocando o entupimento do filtro (HINDS,1998).

Por tempo foram usados somente os filtros de fibra de quartzo (Pallflex 2500 QAT-UP) para coletar o material particulado que é transportado pelo ar para a subsequente determinação do conteúdo de carbono por análise térmica. Todavia atributos fazem desses

filtros satisfatórios para este propósito, como a sua estabilidade térmica, a alta eficiência na coleta de partículas e o baixo custo (HINDS, 1998, KIRCHSTETTER *et al.*, 2001). Entretanto através da revisão bibliográfica não há indícios de sua utilização na coleta de material particulado em trabalhos com altas temperaturas, o que torna interessante o estudo do mesmo visto a sua resistência a altas temperaturas como amostrador em coletas de material particulado.

Os filtros cerâmicos celulares formam uma rede interconectada de filamentos sólidos ou placas os quais formam os lados ou faces das células, que podem ser distribuídos em duas ou três dimensões. O arranjo mais simples é o bidimensional que tem a estrutura de uma colméia. Uma característica dos meios celulares é sua baixa queda de pressão em relação aos meios granulares. As estruturas celulares apresentam baixa densidade relativa, que permitem a fabricação de componentes leves e rígidos. Devido a sua baixa condutividade térmica, esses materiais são utilizados como isolantes térmicos, sendo sua condutividade térmica menor que qualquer isolante convencional. A resistência à compressão faz das espumas um material atrativo para absorção de choques (FREITAS, 2003, MOREIRA, 2003).

2.3.1 Critérios de seleção de um filtro

A escolha do material filtrante depende do desempenho da filtração e das propriedades mecânicas (rigidez, ductilidade, fragilidade), ou seja, o filtro tem que resistir ao impacto mecânico da filtração repetida e das oscilações dos ciclos de limpeza (BUSTNES E MACKLEY, 2005).

Nas operações de filtração duas preocupações principais estão presentes. Um filtro deve ser altamente capaz de capturar os sólidos produzidos de uma baixa concentração de material sem ocasionar uma indevida queda de pressão, ou seja, remover o máximo de impurezas com a mínima resistência ao fluido de arraste. Sendo suficientemente poroso para permitir satisfatória vazão de ar a uma queda de pressão compatível com o processo.

A segunda preocupação é relacionada à redução na habilidade do filtro para transmitir o ar por ele, devido ao acúmulo de partículas. Para um filtro em operação seu carregamento com as partículas do gás resulta em um aumento contínuo na queda de pressão pelo filtro, que pode conduzir ao entupimento do filtro (MIGUEL, 2003). O material filtrante deve ser limpo *in situ* para permitir o seu uso novamente. Isto significa que as partículas que são capturadas não devem aderir tão firmemente na superfície do filtro de forma que não

possa ser desalojado e nem que sejam transportados através do filtro. Apresentando uma textura de superfície que favoreça a rápida liberação da torta durante a limpeza. Sendo capaz de resistir as forças de tensão causadas pela pressão, por perturbações mecânicas e pelo processo de pulsação durante o processo de limpeza. Além de resistir à abrasão e as altas temperaturas da exaustão de gases (CAVASSENO, 1980).

O grau de eficiência do filtro para um dado tamanho de partícula é definido pela relação entre as frações retida e inicial neste tamanho de partícula. Na determinação do grau de eficiência do filtro é necessário medir as distribuições de tamanho de partículas da suspensão original e das partículas que foram retidas ou passaram pelo filtro.

Os principais critérios de avaliação de filtros do tipo barreira, independente da sua estrutura ou aplicação, é determinada pela permeabilidade, à eficiência na retenção de impurezas e a resistência mecânica (INNOCENTINI, 1997, SALVINI *et al.*, 2000). Dentre os principais parâmetros de projeto que influenciam diretamente na filtração de gases é a velocidade superficial do gás, a queda de pressão no filtro, a concentração de pó e a eficiência de coleta. Outros parâmetros também são importantes para a caracterização do meio filtrante como, densidade e porosidade e tamanho médio de poros ou fibras. Na Tabela 2.5 estão apresentados os valores mais comuns desses parâmetros.

Tabela 2.5. Parâmetros de projeto utilizados mais frequentemente na filtração de gases. (Adaptado de MATTESON, 1987).

Filtração de Gases	
Velocidade do gás (v_s)	0,5 a 10 cm/s
Queda de pressão do filtro limpo (ΔP_0)	60 a 200 Pa
Queda de pressão máxima de operação (ΔP)	500 a 2500 Pa
Concentração de pó (C)	0,01 a 100 g/m ³
Massa de pó depositada por unidade de área (W)	200 a 2000 g/m ³
Eficiência de coleta (η)	99,9 a 99,99%

A operação com filtros de barreira também é influenciado pelas propriedades adesivas e coesivas das partículas e o meio filtrante. Essas propriedades são determinadas pelas forças entre as partículas e a forças entre as partículas e o meio. Em geral, essas forças sofrem um aumento com a elevação da temperatura que combina com diferentes mecanismos (PILZ, 1996).

A análise conjunta do desempenho de um material filtrante além de depender

da estrutura do filtro (porosidade, diâmetro de fibra) serão também influenciadas pelas condições de operação (velocidade de filtração, temperatura de trabalho) e das características do gás a ser limpo (densidade, tamanho de partícula).

2.4 Escoamento de fluidos em meios porosos

Para estudar o escoamento de fluidos em meios porosos, é necessário inicialmente especificar os conceitos dos dois materiais envolvidos no problema: fluidos e meios porosos.

2.4.1 Meios Porosos

Pode-se definir um meio poroso como um meio sólido que contém poros. Poros são espaços "vazios", que podem ser distribuídos de diversas maneiras no meio. De acordo com essa descrição, são exemplos de meios porosos: leitos, rochas porosas, agregados fibrosos como tecidos e filtros, e partículas catalíticas contendo micro-poros extremamente pequenos. Além disso, os meios porosos podem ser classificados como tendo seus poros interconectados ou não. No caso de poros interconectados, a parte sólida do meio poroso representa a fase dispersa. Por exemplo, meios porosos granulares e fibrosos apresentam poros interconectados. Também, os meios porosos podem ser naturais, como rochas e o solo, ou sintéticos, como leitos fluidizados e filtros industriais. Finalmente, outra classificação se baseia na distribuição espacial dos poros, ou dos grãos ou fibras, que podem estar distribuídos ordenadamente ou de maneira randômica, esta última abrangendo a grande maioria dos meios porosos reais (LISBOA, 2001).

2.4.2 Fluido

Um fluido, por definição, é uma substância que se deforma continuamente sob ação de qualquer força tangencial. Nesta definição, não é levada em conta a estrutura molecular do fluido, que é composto de diversas moléculas em movimento. Os fluidos nos qual a taxa de deformação é diretamente proporcional à tensão de cisalhamento são conhecidos como *newtonianos*. O modelo de fluido ideal supõe viscosidade nula. Os escoamentos onde se desprezam os efeitos da viscosidade são denominados *não-viscosos*. Apesar de não haver fluidos sem viscosidade, em muitos casos a hipótese da inexistência das

forças viscosas simplifica a análise e, ao mesmo tempo, leva a resultados práticos significativos. Em outros casos onde a camada-limite desempenha papel fundamental, os escoamentos viscosos, de grande importância na mecânica dos fluidos (FOX & McDONALD, 1995), devem ser considerados. Os regimes de escoamentos viscosos são classificados em *laminar* ou *turbulento*, tendo por base a sua estrutura. No regime laminar, a estrutura do escoamento é caracterizada pelo movimento suave em camadas. A estrutura do escoamento no regime turbulento é caracterizada por movimentos aleatórios, tridimensionais e transientes, de partículas fluidas, adicionais ao movimento principal (LISBOA, 2001).

2.4.3 Permeabilidade de Meios Porosos

A permeabilidade de um meio poroso é um dos principais parâmetros em aplicações envolvendo filtração. A permeabilidade é a propriedade de um meio poroso que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de seus poros ou vazios. A passagem do fluido provoca uma perda de energia, que é refletida na forma de queda de pressão ao longo do meio poroso (INNOCENTINI, 1997, MIGUEL, 2003, FREITAS *et al.*, 2004, MOREIRA *et al.*, 2004). A queda de pressão em um filtro é tão importante quanto a eficiência, e às vezes, até mesmo mais importante. Não é difícil obter elevados valores de eficiência (acima de 99,9%) no caso de filtros de tecido, entretanto altos valores de pressão podem inviabilizar completamente esse processo (MATESSON, 1987).

O estudo dos meios porosos, definidos como meios sólidos que contêm espaços vazios em seu interior têm despertado interesses em diversos campos da ciência e da engenharia. Este estudo tem aplicações em mecânica dos solos, hidrologia, engenharia petrolífera, purificação da água, filtragem industrial, geração de energia, refrigeração, engenharia têxteis e diversas outras áreas de atuação. Os meios porosos podem ser classificados em função da sua estrutura como granulares ou fibrosos. Os granulares são usualmente modelados como um conjunto de partículas ou grãos, de forma esférica ou não, dispostas regular ou randomicamente, e representam a grande maioria dos meios porosos. Já os fibrosos são modelados como conjuntos de inclusões muito longas, chamadas fibras, que podem ser naturais ou sintéticas, retas ou curvas, estando randomicamente dispostas ou em malhas regulares (LISBOA, 2001).

Meios porosos fibrosos têm aplicações como filtros para remoção de partículas finas em correntes de fluidos, como feixes de tubos de trocadores de calor e de núcleos de

reatores nucleares, e também em sistemas biológicos. Por não serem tão comuns como os granulares, eles foram menos estudados e muito menos se sabe sobre como a estrutura do meio pode influenciar na sua resistência ao escoamento (JACKSON & JAMES, 1986).

A primeira relação empírica que quantificava a resistência ao escoamento, em baixa velocidade, de um fluido, foi proposta por Darcy em 1856. A lei de conservação de massa (*lei de Darcy*), e a lei dos gases ideais caracterizam um escoamento em leito fixo em meios porosos sendo expressa pela:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k_1} v_s \quad (2.1)$$

onde, ΔP é a queda de pressão na direção do escoamento; μ é a viscosidade do fluido; L é a espessura do meio ; k_1 a permeabilidade Darciana; v_s é a velocidade superficial de escoamento que é a vazão volumétrica pela área de seção transversal, perpendicular ao escoamento do fluido. Para altos números de Reynolds (Re)— $Re = \rho v k^{0.5} / \mu > 1$ no caso de filtros e telas — a *lei de Darcy* é inconsistente e a relação de *Dupuit-Forcheimer* deve ser aplicada (Equação 2.2) (NIELD & BEJAN, 1999 *apud* MIGUEL, 2003).

REYNOLDS, segundo ERGUN (1952), foi o primeiro a formular a resistência oferecida pela fricção do fluido como uma soma de dois termos, proporcionais respectivamente à velocidade do fluido (primeiro termo da equação 2.2) que representa a contribuição das forças viscosas sobre a queda de pressão causada pelo atrito entre as moléculas do fluido, e pelo atrito entre o fluido e o meio poroso, e o quadrado da velocidade (segundo termo da equação 2.2) que representa as forças inerciais causados pela turbulência do fluido escoante e/ou pela tortuosidade do meio poroso (INNOCENTINI, 1997, MOREIRA *et al.*, 2004). Sendo assim a permeabilidade pode ser determinada pela Equação 2.2, conhecida como equação de Forchheimer para fluidos compressíveis (gás ideal), onde a queda de pressão através do meio poroso descreve uma dependência não-linear com a velocidade do fluido.

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2P_s L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (2.2)$$

onde P_e é a pressão absoluta na entrada da amostra; P_s é a Pressão absoluta na saída; e ρ é a densidade do mesmo;; k_1 e k_2 são as permeabilidades Darciana e não-Darciana, respectivamente.

A predominância do termo viscoso ou inercial é função da faixa de Re utilizado para um determinado fluido, ou seja, é função da faixa de velocidades utilizada e das

constantes k_1 e k_2 . Em velocidades típicas de filtração ($v_s < 10 \text{ cm/s}$), geralmente apenas o primeiro termo é significativa e a Equação 2.1 reduz-se à tradicional *lei de Darcy*.

2.4.3.1 Correlações para o cálculo da permeabilidade.

As equações que descrevem a permeabilidade em meios porosos rígidos são frequentemente utilizadas para o caso dos meios fibrosos. A descrição da permeabilidade começou a ser realizada através de equações empíricas como função da porosidade e das dimensões das partículas que compõe o leito.

KOZENY em 1927 mostrou que a permeabilidade de um meio poroso é inversamente proporcional ao quadrado da superfície específica (superfície exposta ao fluido por unidade de volume) e proporcional ao cubo da porosidade (relação entre o volume de vazio e o volume total do meio poroso). O fator de proporcionalidade é chamado de *constante de Kozeny*. Esta proporcionalidade tem o objetivo de ser aplicável a qualquer meio poroso, visto que as constantes utilizadas envolvem a estrutura detalhada do meio. O tratamento básico utilizado por Kozeny foi modificado em diversas ocasiões. Nestas alterações, o resultado de que a permeabilidade é inversamente proporcional ao quadrado da superfície específica foi mantido, entretanto, existe uma grande dúvida sobre o expoente correto da porosidade. Equações análogas à equação apresentada por ele são chamadas de Equações de KOZENY, sendo o expoente da porosidade fornecido por KOZENY ou não. A primeira equação semi-empírica que correlaciona à diferença de pressão foi baseada no trabalho de KOZENY, mais tarde expandido por CARMAN, obtendo a equação de CARMAN-KOZENY. Para meios fibrosos, apresentada pela equação 2.3 (KAY E NEDDERMANN, 1985):

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{32 \cdot k_0 \cdot \mu \cdot v_s}{d_f^2} \cdot \frac{(1-\phi)^2}{\phi^3} \quad (2.3)$$

onde dP é a queda de pressão na direção do escoamento, dl é a espessura do filtro, d_f é o diâmetro da fibra (m) e $\phi = 1 - \epsilon$. O parâmetro k_0 é dependente da orientação da fibra no escoamento. A equação não é bem representada para porosidades acima de 0,88 (BUSTNES E MACKLEY, 2005). O fato da equação de Kozeny-Cárman não representar bem os dados para a permeabilidade em meios fibrosos de elevadas porosidade, levou ao desenvolvimento de várias correlações baseadas na equação de Navier-Stokes para escoamento normal e ou

paralelo ao redor do cilindro isolado ou de um conjunto de cilindros sob vários tipos de arranjos, ou ainda correlações empíricas (CAETANO, 1992).

IBERALL em 1950 usou tal modelo levando em conta a distribuição randômica das fibras cilíndricas circulares de mesmo diâmetro e supondo que o meio fibroso fosse poroso o suficiente para que não houvesse interações entre as fibras, desenvolveu uma equação baseada na superposição das soluções de Emersleben e Oseen para a força de arraste ao redor do cilindro isolado, orientados paralelamente e perpendicularmente ao escoamento (IBERALL, 1950, SCHEIDEGGER, 1974, BUSTNES E MACKLEY, 2005, TOMADAKIS *et.al*, 2005) obtendo o seguinte resultado:

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{16\mu.v_s.(1-\varepsilon)}{3.d_f^2} \cdot \frac{4 - \ln N_{Re}}{2 - \ln N_{Re}} \quad (2.4)$$

onde: $N_{Re} = \frac{\rho.v.d}{\varepsilon.\mu}$

Modelos empíricos como o obtido por DAVIES em 1952, que foi baseado na análise dimensional da equação de Darcy. O autor obteve a seguinte correlação:

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{\mu.v_s.f(\phi)}{d_f^2} \quad (2.5)$$

onde: $f(\phi) = 64.\phi^{1.5}.(1 + 56.\phi^3)$, $\phi = 1 - \varepsilon$.

Foram obtidos $f(\phi)$ para vários materiais fibrosos, como algodão, fibras de celulose apresentando segundo DAVIES pequenos desvios em relação aos dados experimentais. Também não houve dependência apreciável dos dados do autor quanto ao comprimento da fibra, havendo maior influência em relação ao material e ao método de formação do leito (CAETANO, 1992). A equação 2.5 proposta por DAVIES se ajusta aos seus dados, fornecendo bons valores para porosidades compreendidas entre 0,6 e 1, para $Re < 1$ segundo o trabalho de JACKSON & JAMES, 1986.

CHEN em 1955, também fez uma análise das equações de IBERALL, LANGMUIR E DAVIES, relatando que, para cada porosidade, existe um número de Reynolds crítico para o qual não há interferência entre as fibras vizinhas, valendo, portanto a equação 6 desenvolvida para o escoamento ao redor do cilindro:

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{4}{\pi} \frac{k_1}{\ln\left(k_2(1-\phi)^{-\frac{1}{2}}\right)} \frac{1-\phi}{\phi} \frac{\mu.v_s}{(d_f)_s^2} \quad (2.6)$$

na qual tem os ajustes dos parâmetros k_1 e k_2 (CAETANO, 1992; BUSTNES E MACKLEY,

2005).

MACDONALD *et al.*, em 1979, testaram a equação de Ergun (1952), uma das correlações mais amplamente aplicadas para estimar a queda de pressão em meios granulares, seguindo a mesma linha de discussão e trabalhando com várias formas de partículas esféricas e não-esféricas e fibras cilíndricas, propuseram uma equação do tipo Ergun da forma:

$$-\frac{dP}{dl} = A \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu \cdot v_s}{d_p^2} + B \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho \cdot v_s^2}{d_p} \quad (2.7)$$

onde d_p é diâmetro do poro.

Neste trabalho os autores propuseram que para a região viscosa o parâmetro A assumo o valor de 180 e o parâmetro B seja função da rugosidade das partículas. Sugerem para partículas lisas, o valor de 1,8 e, para partículas rugosas 4 (MACDONALD *et. al*, 1979). A correlação do tipo Ergun para meios fibrosos não representou bem os dados para leitos de elevadas porosidades. Segundo os autores o expoente da porosidade deve ser maior que três (aproximadamente 3,6) na referida equação 2.7 (MACDONALD *et. al*, 1979)

JACKSON & JAMES (1986) compilaram vários trabalhos sobre escoamento em meios porosos fibrosos, entre os trabalhos pesquisados, estes autores selecionaram apenas os artigos cujos dados estivessem de acordo com a Lei de Darcy, ou seja, houvesse proporcionalidade entre a vazão volumétrica e a diferença de pressões imposta (regime não-inercial). No artigo de JACKSON & JAMES (1986), inicialmente são apresentados os estudos experimentais, os quais não são classificados em função do tipo de escoamento ou arranjo de fibras. A ausência de classificação se deve ao fato de que a maior parte os estudos não descrevem a geometria do meio poroso nem a direção do escoamento (provavelmente por serem, a rigor, tridimensionais).

Na segunda parte, são apresentados os estudos teóricos, divididos nos casos de escoamento longitudinal a um arranjo de fibras paralelas, escoamento transversal a um arranjo de fibras paralelas e escoamento através de arranjos tridimensionais. Para o cálculo da permeabilidade em arranjos complexos tridimensionais entrelaçados, comuns na prática, JACKSON & JAMES (1982) propõem um modelo que utiliza uma combinação de resultados para permeabilidade transversal e longitudinal:

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{80 \cdot \mu \cdot v_s}{3 \cdot d_f^2} \frac{[1-\varepsilon]}{[-\ln(1-\varepsilon) - 0,931 + (\ln(1-\varepsilon))^{-1}]} \quad (2.8)$$

Entretanto, para se utilizar o modelo proposto faltam ainda resultados para a permeabilidade longitudinal em meios randômicos (JACKSON E JAMES, 1986; LISBOA, 2001; BUSTNES *et al.*, 2005). No artigo de RAHLI *et. al.*, 1996 os autores analisaram os seus dados experimentais da permeabilidade e comparou com os modelos preditos, os mesmos apontam que esta lei é somente válida para valores de elevadas porosidades ($\epsilon > 0,7$).

SAHRAOUI E KAVIANY (1992) baseados em estudos nas soluções numéricas das equações de Navier-Stokes utilizaram um método diferencial para um fluxo bidimensional através de cilindros dispostos. A lei da variação para a permeabilidade vs porosidade deduz desta aproximação:

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{\mu \cdot v_s}{0,0606 \cdot d_f^2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^{5,1}} \quad (2.9)$$

RAHLI *et al.*, 1996, testou a equação de SAHRAOURI E KAVIANY (1992) de fibras feitas de fios de arame (cobre, bronze) e verificaram que os resultados foram inferiores aos seus dados experimentais.

No artigo de WESTHUIZEN E DU PLESSIS de 1996, apresenta uma simples solução para esclarecer os efeitos da permeabilidade durante o fluxo transversal e longitudinal através de um leito fibroso. A metodologia foi primeiramente introduzida por DU PLESSIS E MASLIAYAH em 1988 para esponjas porosas e mais tarde estendidas pelos autores para leito de fibras unidirecional (DU PLESSIS & WESTHUIZEN 1996, TOMADAKIS *et.al.*, 2005).

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{192 \mu v (1-\epsilon)^2}{d_f (5.299 - 2.157\epsilon)\epsilon^2} \quad (2.10)$$

2.4.4 Parâmetro Estrutural – Porosidade.

Informações sobre as características estruturais do meio poroso são importantes para determinar a eficiência na filtração de gases.

A porosidade é um parâmetro do meio filtrante que corresponde à relação de vazios presentes no meio. Os filtros devem apresentar uma porosidade que não resulte em uma elevada resistência ao fluido, mas que evite a penetração de partículas na sua estrutura. A porosidade total (ϵ_t) que contabiliza poros que contribuem e não contribuem para o

escoamento (poros abertos e poros fechados) é obtida pela equação 2.11 (SALVINI *et. al*, 2000):

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{\rho_g}{\rho_s} \quad (2.11)$$

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

A porosidade pode ser dividida dentro de três grupos: Porosidade Fechada onde os poros estão isolados, sem contato com outros poros e com a superfície da sua estrutura. Esses poros são indesejáveis, por não contribuírem para o transporte do fluido e diminuïrem a sua resistência mecânica. Porosidade Aberta englobam todos os poros que podem ser preenchidos por um fluido. Embora sejam abertos nem todos contribuem para o escoamento do fluido. Porosidade interconectada apresenta comunicação com a superfície externa do meio. É a que realmente interessa ao processo de filtração.

Existem algumas técnicas para a determinação experimental da porosidade, entre elas podemos citar o método óptico, que baseia na análise de fotografias ou micrografias da superfície do meio poroso. Está técnica pode ser uma simples ampliação da imagem e quantificação por métodos tradicionais pela digitalização e análise, em computador, dos pixels da imagem. Dentre os parâmetros obtidos por está técnica duas merecem atenção especial neste trabalho: área do poro e diâmetro equivalente. Um dos principais imprevistos na análise de imagens é que a definição de poro pode ser mal interpretada (INNOCENTINI, 1997; MOREIRA, 2004).

O método de porosimetria de mercúrio a porosidade total é determinada pela equação 2.12:

$$\varepsilon_t = 1 - \frac{V_B - V_R}{V_{pen} - V_{Hg}} \quad (2.12)$$

em que V_{pen} é o volume do penetrômetro vazio, o V_{Hg} é o volume de mercúrio intrudido, o V_B o volume da amostra e V_R o volume total de mercúrio retido nos poros. Este método fornece o diâmetro volumétrico médio do poro e sua distribuição no interior da amostra, além da porosidade total da amostra.

No método de expansão de gás, são usados dois vasos comunicantes, de volumes conhecidos, sendo um submetido a vácuo e o outro que contém a amostra porosa, está com gás à pressão conhecida. Quando é permitida a expansão do gás, é lida a nova

pressão (DULLIEN, 1992):

$$V_p = V_{am} - V_a - V_b \left[\frac{P_i}{(P_f - P_i)} \right] \quad (2.13)$$

em que V_p é o volume dos poros, V_{am} o volume da amostra, V_a o volume do recipiente que contém a amostra, V_b o volume do vaso submetido à vácuo, P_i a pressão inicial e P_f a pressão final.

A porosidade aparente (ϵ) representa a fração de vazios da estrutura que pode ser completamente preenchida com um líquido. Apenas os poros abertos são considerados neste teste, fornecendo uma idéia dos poros “permeáveis” da estrutura. A porosidade aparente é calculada pela equação 2.14:

$$\epsilon(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} 100\% \quad (2.14)$$

onde P_u é o peso úmido ou massa da amostra com todos os poros preenchidos com o líquido; P_i é o peso imerso, que é a resultante entre empuxo e força gravitacional atuando sobre a amostra em repouso no líquido e P_s o peso seco da amostra. Para determinação da porosidade pelo método da densidade são utilizadas as Eq. 2.11 e 2.14.

2.5 Coleta de partículas em um meio filtrante.

A operação de filtração consiste basicamente na passagem de um gás contendo um material particulado através de um meio filtrante - um meio poroso e permeável - com a finalidade de separar as partículas contidas na corrente gasosa. A filtração envolve três estágios em um filtro: captura da partícula pela superfície coletora, retenção da partícula capturada na superfície, e o efeito da partícula retida sobre a próxima partícula coletada. Nos primeiros instantes de filtração vários mecanismos contribuem para o contato entre o material particulado e o meio filtrante. As fibras do meio filtrante são responsáveis pela captura das partículas. Nesta fase, a penetração de partículas através do meio é maior, ocasionando em uma menor eficiência de captura (GRAEF *et al.*, 1995). A duração desta fase inicial de filtração é caracterizada pelo lento acréscimo da perda de carga (CALLÉ *et al.*, 2002). A duração desta fase é mais pronunciada no primeiro ciclo, com um tecido virgem, e tem sua

duração sensivelmente diminuída nos ciclos subseqüentes. No caso de filtros HEPA (High Efficiency Particulate Aerosol), esta etapa praticamente inexistente, sendo a formação da torta quase instantânea (JAPUNTICH *et al.*, 1994). Após algum tempo, as partículas que estão retidas no filtro, passam a reter novas partículas do aerossol, aumentando a eficiência de coleta do filtro (CALLÉ *et al.*, 2002, AL-OTOOM *et al.*, 2005). Vários mecanismos interferem diretamente durante o escoamento do gás carregado de partículas através do meio coletor. São 5 os mecanismos básicos que atuam na coleta de partículas em um filtro:

2.5.1 Mecanismo Difusional

Este mecanismo resulta do movimento aleatório (browniano) das partículas menores que estão sujeitas em um gás. No caso específico as partículas submicrométricas e/ou em baixas velocidades de filtração, tão pequenas e com tão pouca massa são influenciadas por um bombardeamento de moléculas de gás ao redor da partícula. A Figura 2.3 demonstra a trajetória de uma determinada partícula bombardeada pelas moléculas do gás até ser coletada na fibra. Para o cálculo da eficiência de coleta pelo mecanismo difusional incluem-se entre os adimensionais importantes os números de *Peclet* (Pe), *Cunningham* (Cu) e *Knudsen* (Kn) (HINDS, 1998).

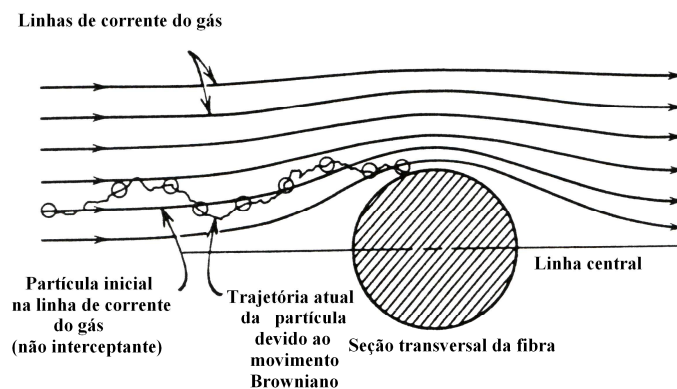


Figura 2.3. Mecanismo de coleta por difusão (HINDS, 1998).

2.5.2 Mecanismo Inercial

Este mecanismo resulta da inércia da partícula carregada pela corrente gasosa. As linhas de corrente do gás se curvam ao passar em torno da fibra coletora, caso a partícula não tenha massa, ou se for muito leve, a partícula pode seguir a linha de corrente de gás e contornar a fibra. Entretanto devido ao fato da partícula ter massa (partículas de $10\mu\text{m}$ ou

maiores), a capacidade de uma partícula acompanhar estas linhas de corrente do gás decresce com o aumento da massa, devido a inércia, sendo assim a mesma desliza da linha de corrente do gás, colidindo com a fibra e sendo coletada, como mostrada na Figura 2.4. O principal parâmetro para o cálculo da eficiência por impactação inercial é o número de *Stokes*, que envolve o diâmetro da partícula do aerossol, a velocidade, densidade e viscosidade do gás (INOCENTINNI, 1997, HINDS, 1998).

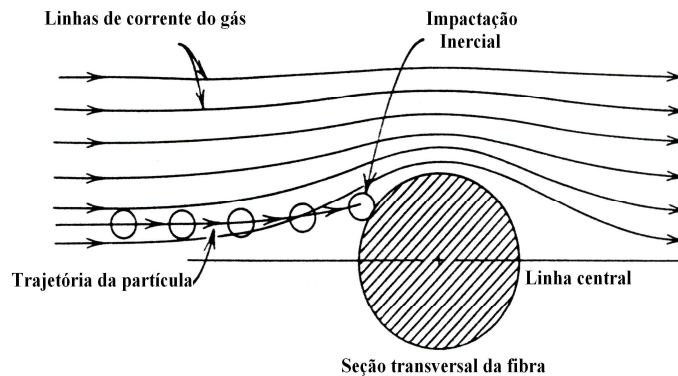


Figura 2.4. Mecanismo de coleta de impactação inercial (HINDS, 1998).

2.5.3 Mecanismo de interceptação direta.

A coleta por interceptação direta acontece quando uma partícula que segue as linhas de corrente do gás pode ser capturada quando seu centro passa pela superfície da fibra coletora a uma distância menor ou igual ao seu raio. Este mecanismo resulta do tamanho relativo entre a partícula e a superfície da fibra, sendo significativo para partículas de diâmetros grandes na ordem de grandeza pouco abaixo do diâmetro do coletor. A coleta então irá depender das propriedades do transporte no fluido e da razão entre diâmetro da partícula e diâmetro do coletor (Figura 2.5) (COURY, 1983, HINDS, 1998).

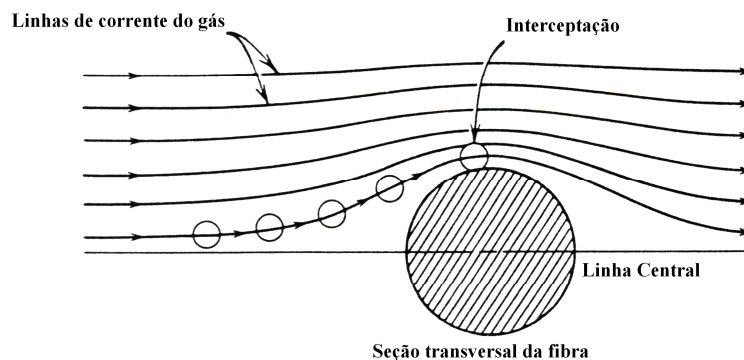


Figura 2.5. Mecanismo de coleta por interceptação (HINDS, 1998).

2.5.4 Mecanismo gravitacional

O mecanismo gravitacional atua na coleta da partícula por alterar sua trajetória normal, favorecendo o contato com o coletor. O efeito da gravidade causa um desvio na trajetória da partícula como mostrado na Figura 2.6. Este mecanismo é dominante para baixas velocidades do gás e grandes partículas ($St > 10$), além de depender da direção do fluxo, a eficiência de coleta é maior quando o fluxo ocorre de cima para baixo de que de baixo para cima (COURY, 1983).

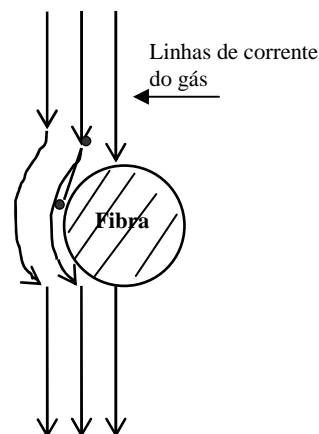


Figura 2.6. Mecanismo de coleta gravitacional.

2.5.5 Mecanismo de forças eletrostáticas

As forças eletrostáticas podem proporcionar um aumento na eficiência de coleta de partículas durante a filtração. Além dos mecanismos denominados mecânicos, estudos têm demonstrado que as forças eletrostáticas podem ser de grande importância no processo de filtração. A atração elétrica entre a partícula e a fibra coletora poderá ocorrer pela presença de cargas na partícula ou pode ser induzida por um campo elétrico. A Figura 2.7 demonstra um exemplo de coleta eletrostática onde existe a atração entre a partícula carregada e o coletor carregado com carga oposta.

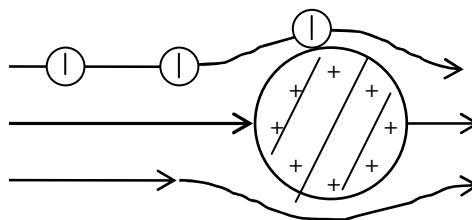


Figura 2.7. Mecanismo eletrostático de coleta (adaptado COURY, 1986).

Desta forma a eficiência de coleta em qualquer filtro depende do mecanismo de coleta. Expressões para quantificar a eficiência de coleta dos mecanismos citados acima foram propostas por diversos autores e facilmente são descritos na literatura.

2.6 Quantificação dos Mecanismos

Diversos autores propuseram equações para quantificar a eficiência de coleta de um único coletor segundo os vários mecanismos. A seguir são listadas algumas correlações, que são bastante utilizadas para a coleta de partículas para os diferentes mecanismos.

Mecanismo Difusional

Vários autores derivaram expressões semi-empíricas para o cálculo de η_D , que apresentam a seguinte forma:

$$\eta_D = f(\epsilon) \cdot N_{Pe}^{-2/3} \quad (2.15)$$

O mecanismo difusional resulta do movimento randômico a que pequenas partículas estão sujeitas em um gás. TIEN (1989) propôs a seguinte correlação para estimar a eficiência de coleta em meios granulares segundo o mecanismo difusional:

$$\eta_D = 4 \cdot (1 - \epsilon)^{2/3} \cdot A_S^{1/3} \cdot N_{Pe}^{-2/3} \quad (2.16)$$

onde A_S , o parâmetro de Happel, é dado pela seguinte expressão:

$$A_S = \frac{2 \cdot [1 - (1 - \epsilon)^{5/3}]}{2 - 3 \cdot (1 - \epsilon)^{1/3} + 3 \cdot (1 - \epsilon)^{5/3} - 2 \cdot (1 - \epsilon)^2} \quad (2.17)$$

e o número de Peclet (N_{Pe}) por:

$$N_{Pe} = \frac{v_s \cdot d_c}{D} \quad (2.18)$$

onde d_c é o diâmetro médio do coletor e v_s é a velocidade de filtração.

O coeficiente de difusão (D) devido ao movimento Browniano pode ser estimado pela equação de Stokes-Einstein:

$$D = \frac{K_B \cdot T \cdot F_S}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p} \quad (2.19)$$

onde, K_B é a constante de Boltzmann, d_p é o diâmetro da partícula, μ é a viscosidade do fluido, T a temperatura absoluta.

O fator de escorregamento de Cunningham (F_S) que corrige a força de arraste nas partículas pode ser obtido por ALLEN *et al.*, 1985 como:

$$F_S = 1 + \frac{\lambda}{d_p} \left[2,34 + 1,05 \exp\left(-0,39 \cdot \frac{d_p}{\lambda}\right) \right] \quad (2.20)$$

onde, d_p é o diâmetro da partícula em metros.

No caso do fluido ser ar,

$$\lambda = 2,15 \cdot 10^{-4} \cdot \mu \cdot P \cdot T^{0,5} \quad (2.21)$$

onde P é a pressão em bar; T a temperatura absoluta em Kelvin; μ é a viscosidade do fluido em kg/m.s.

Para os meios fibrosos, Lee e Liu (1982), desenvolveram a seguinte equação para a eficiência individual da fibra (SONG *et al.*, 2006):

$$\eta_D = 2,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku}\right)^{1/3} N_{Pe}^{-2/3} \quad (2.22)$$

onde Ku é o fator hidrodinâmico de Kuwabara representado pela seguinte equação:

$$Ku = \frac{-\ln(1-\varepsilon)}{2} - \frac{3}{4} + (1-\varepsilon) - \frac{(1-\varepsilon)^2}{4} \quad (2.23)$$

Mecanismo Inercial

A análise adimensional sugere que cada correlação deva ter a forma:

$$\eta_I = f(N_{St}, N_{Re}, \varepsilon) \quad (2.24)$$

O mecanismo inercial é resultante da inércia da partícula que está sendo carregado pela corrente gasosa. Esse mecanismo é dominante para altas velocidades do gás. A expressão proposta por JUNG *et al.* 1989 para meios granulares, representa este mecanismo:

$$\eta_I = 0,2589 \cdot N_{Steff}^{1,3437} \cdot N_R^{0,23} \quad (2.25)$$

onde N_R e N_{Steff} são o parâmetro relativo a tamanho e o número de Stokes efetivo respectivamente, dados por:

$$N_{Steff} = [A_S + 1,14 \cdot N_{Re}^{1/2} \cdot \epsilon^{-3/2}] \cdot \frac{N_{St}}{2} \quad (2.26)$$

$$N_R = \frac{d_p}{d_C} \quad (2.27)$$

O número de Reynolds (N_{Re}) é dado pela Equação (2.14):

$$N_{Re} = \frac{\rho_{ar} \cdot v_s \cdot d_C}{\mu} \quad (2.28)$$

onde d_C é o diâmetro médio do coletor, v_s é a velocidade de filtração, ρ_{ar} é a densidade do fluido e μ é a viscosidade do fluido.

E o número de Stokes (N_{St}) é expresso por:

$$N_{St} = \frac{\rho_P \cdot d_p^2 \cdot v_s \cdot F_S}{9 \cdot \mu \cdot d_C} \quad (2.29)$$

onde, ρ_P é a densidade da partícula, d_p é o diâmetro da partícula.

Para os meios fibrosos, a eficiência inercial pode ser dada pela equação proposta por FRIEDLANDER E PASCERI *apud* SONG *et al.*, 2006:

$$\eta_I = \frac{N_{St}^3}{N_{St}^3 + 0,77 \cdot N_{St}^2 + 0,22} \quad (2.30)$$

Sendo:

$$N_{St} = \frac{\rho_P \cdot d_p^2 \cdot v_s \cdot F_S}{18 \cdot \mu \cdot d_C} \quad (2.31)$$

onde N_{St} é o número de Stokes e ρ_P a densidade da partícula.

Mecanismo de Intercepção Direta

Por análise adimensional temos que a eficiência de coleta por intercepção direta é função de:

$$\eta_{ID} = f\left(\varepsilon, N_{Re}, \frac{d_p}{d_c}\right) \quad (2.32)$$

O mecanismo de intercepção direta resulta do tamanho relativo entre a partícula e o coletor. Esse mecanismo é significativo para partículas de diâmetros grandes. A expressão proposta por PARETSKY *et. al.* 1971 foi usada para estimar o efeito da intercepção direta na coleta da partícula para meios granulares:

$$\eta_{ID} = 6,3 \cdot \varepsilon^{-2,4} \cdot \left(\frac{d_p}{d_c}\right)^2 \quad (2.33)$$

Para meios fibrosos, Lee e Liu (1982), propuseram a seguinte equação para o cálculo da eficiência por intercepção direta (SONG *et al.*, 2006):

$$\eta_{I,D} = 0,6 \left(\frac{\varepsilon}{Ku}\right) \left(\frac{R^2}{1+R}\right) \quad (2.34)$$

onde R é o parâmetro de intercepção direta dado por:

$$R = \frac{d_p}{d_f} \quad (2.35)$$

Mecanismo Gravitacional

Por análise adimensional temos que a eficiência de coleta pelo mecanismo gravitacional é função de:

$$\eta_G = f\left(\varepsilon, N_{Re}, \frac{v_t}{v_s}\right) \quad (2.36)$$

O mecanismo gravitacional é resultado do efeito da gravidade sobre a partícula, causando um desvio na sua trajetória. É dominante para baixas velocidades e grandes partículas. A eficiência depende da direção e do sentido da corrente gasosa. A relação proposta por PARETSKY *et. al.* 1971 usada para o cálculo da eficiência de coleta pelo

mecanismo gravitacional para escoamento ascendente é dada para os meios granulares pela seguinte expressão:

$$\eta_G = 3,75 \cdot 10^{-2} \left(\frac{v_t}{v_s} \right)^{1/2} \quad (2.37)$$

onde a velocidade terminal da partícula é dada pela expressão:

$$v_t = \frac{\rho_p \cdot d_p^2 \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (2.38)$$

Para os meios fibrosos a eficiência de coleta do mecanismo gravitacional pode ser descrita por (TARDOS e PFEFFER, 1980):

$$\eta_G = Ga \cdot St \quad (2.39)$$

$$Ga = \frac{d_f \cdot g}{v_s^2} \quad (2.40)$$

onde g é a aceleração da gravidade e Ga é o número de Galileu.

Desse modo é então assumido que a eficiência total de coleta de um único coletor é dada pela soma de todas as eficiências devidas aos mecanismos atuantes, sendo, portanto (DUARTE FILHO *et al.*, 2000):

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_{ID} + \eta_G + \eta_E \quad (2.41)$$

onde, η_D é a eficiência de coleta segundo mecanismo difusional; η_I é a eficiência de coleta segundo mecanismo inercial; η_{ID} é a eficiência de coleta segundo mecanismo de interceptação direta; η_G é a eficiência de coleta segundo mecanismo gravitacional; η_E é a eficiência de coleta segundo mecanismo eletroforético (FREITAS *et al.*, 2006).

A Figura 2.8 ilustra a eficiência pertinente a cada mecanismo e a eficiência total, para um filtro de espessura igual a 1 mm, diâmetro de fibras igual a 2,0 μm , porosidade de 0,95 e velocidade de 0,1m/s, conforme a teoria de captura por uma fibra simples.

De acordo com a Figura 2.8, observa-se que o mecanismo difusional é mais atuante em partículas menores que 0,2 μm , enquanto que os mecanismos gravitacional, inercial e interceptação direta são mais atuantes nas partículas maiores que 2 μm .

Entretanto não é inteiramente correto afirmar que a eficiência total de coleta das partículas é admitida como sendo a soma de todos os mecanismos, uma vez que há influência de um mecanismo sobre o outro.

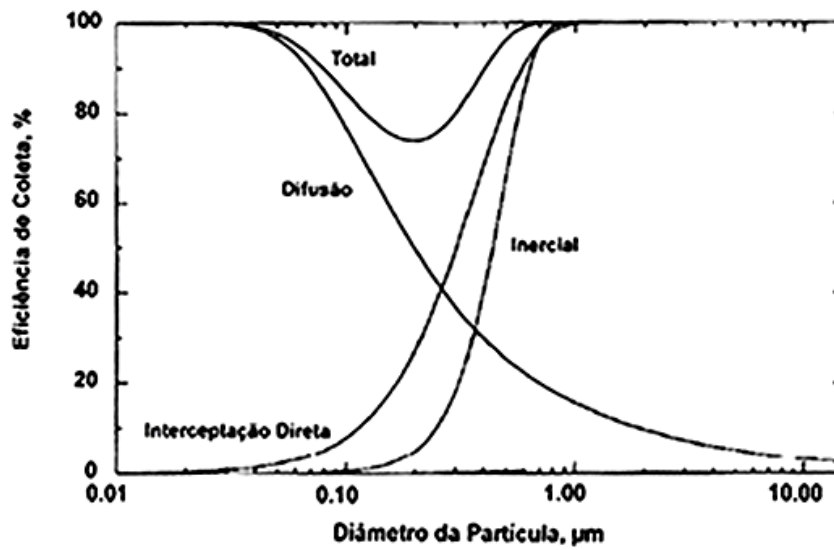


Figura 2.8. Interação dos mecanismos de coleta e eficiência resultante dos mesmos (HINDS, 1998).

A partir desta constatação, FUCHS (1964) mostrou que a eficiência total não é dada pela soma das eficiências pertinentes a cada mecanismo, mas é menor que ela. Isto porque vários mecanismos acabam competindo pela mesma partícula, e sua captura pode ser contabilizada mais de uma vez (HINDS, 1998).

2.7 Eficiência de Coleta do Filtro

Por definição, a capacidade de um filtro de reter partículas pode ser expressa por:

$$E_G = \frac{M_e - M_s}{M_e} \quad (2.42)$$

onde M_e e M_s são a massa de partículas na entrada e saída do filtro, respectivamente. Esta propriedade representa a dimensão global da habilidade de coleta do filtro (YONGCHENG *et al.*, 2000).

A eficiência de coleta experimental, por faixa granulométrica (E_i) pode ser dada pela Eq. 2.43.

$$E_i = \frac{N_{e,i} - N_{s,i}}{N_{e,i}} \cdot 100\% \quad (2.43)$$

onde, $N_{e,i}$ é número de partículas com diâmetro dp_i na entrada do filtro e $N_{s,i}$ é número de partículas com diâmetro dp_i saída do filtro e i é a faixa analisada.

Para os meios fibrosos

A eficiência total de coleta de cada elemento filtrante, incluindo todos os mecanismos de coleta para uma única fibra, pode ser representada pela seguinte equação:

$$\eta_T = \frac{N_p}{N_c} \quad (2.44)$$

sendo que, N_p é o número de partículas depositadas por unidade de tempo e N_c é o número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo.

A equação representa o número de partículas que chegam ao coletor por unidade de tempo:

$$N_c = C.v.d_f L_f .A.dm \quad (2.45)$$

onde C é a concentração, A é a área do filtro, dm um elemento diferencial de espessura do filtro, L_f é definido como sendo o comprimento da fibra por unidade de volume e v a velocidade do gás dada por:

$$v = \frac{v_0}{\varepsilon} \quad (2.46)$$

onde v_0 é a velocidade superficial do gás e ε a porosidade do filtro.

$$N_p = -dC.v_0.A \quad (2.47)$$

onde: $-dC$ representa a mudança nas concentrações das suspensões que entra e sai, respectivamente e v_0 , A , a vazão volumétrica do gás.

Substituindo as equações, temos:

$$-\frac{dC}{C} = \eta_T \frac{d_f}{\varepsilon} L_f .dm \quad (2.48)$$

Considerando que $C=C_e$ para $m=0$ e $C=C_s$ para $m= M$ temos:

$$\ln \frac{C_s}{C_e} = \frac{\eta_T L_f d_f M}{\varepsilon} \quad (2.49)$$

A fração de volume ocupado pelas fibras, β , é dada por:

$$\beta = \frac{\pi d_f^2}{4} .L_f \quad (2.50)$$

O volume total da seção é constituído pela soma do volume ocupado pelas

fibras mais o volume de vazios, porosidade, $\varepsilon = (1-\beta)$. Substituindo as equações, tem-se:

$$P_e = \frac{C_e}{C_s} = \exp\left[-\frac{4M(1-\varepsilon)\eta_T}{\pi\varepsilon.d_f}\right] \quad (2.51)$$

Portanto como $P_e=C_e/C_s$, que representa a penetração, ou seja, a fração numérica de partículas que chegam e não são coletadas. Tem-se a grandeza E, definida como eficiência do filtro, ou seja, a fração de partículas que é coletada pela seção filtrante.

Assim, tem-se a equação da eficiência de coleta para uma única fibra como sendo (SONG *et al.*, 2006, HINDS,1998):

$$E = 1 - P_e = 1 - \exp\left[-\frac{4M(1-\varepsilon).\eta_T}{\pi.\varepsilon.d_f}\right] \quad (2.52)$$

onde M é a espessura do filtro, ε a porosidade do meio, η_T a eficiência de coleta total para cada fibra (Eq. 2.41).

Para os meios granulares

A taxa de coleta de partículas do aerossol por um coletor do filtro (número de partículas coletadas/ tempo) é dada pela equação:

$$r = \eta_T \cdot v \cdot C \cdot \pi \cdot \frac{d_C^2}{4} \quad (2.53)$$

onde r é a taxa de coleta de partículas; d_C o diâmetro médio dos grânulos que formam o leito; C a concentração de partículas.

Se o coletor tem densidade ρ_C , a taxa de coleta por unidade de massa (R) pode ser escrita pela Equação:

$$R = \frac{r}{m} = K_1 \cdot \eta_T \cdot v \cdot \frac{C}{d_C \cdot \rho_C} \quad (2.54)$$

onde, R é a taxa de coleta por unidade de massa; m é a massa; K_1 uma constante.

Fazendo um balanço de massa na camada diferencial (dm) de um leito fixo, mostrado na Figura 2.9, através do qual escoam um gás carregado de partículas com velocidade superficial v, tem-se:

$$A.v.C = A.v.(C + dC) + R.dm \quad (2.55)$$

onde, A é a área do leito.

Substituindo a Equação (2.54) na Equação (2.55) e rearranjando, obtemos a Equação (2.56):

$$\frac{dC}{dm} = \frac{-K_1 \cdot \eta_T \cdot C}{d_C \cdot \rho_C \cdot A} \quad (2.56)$$

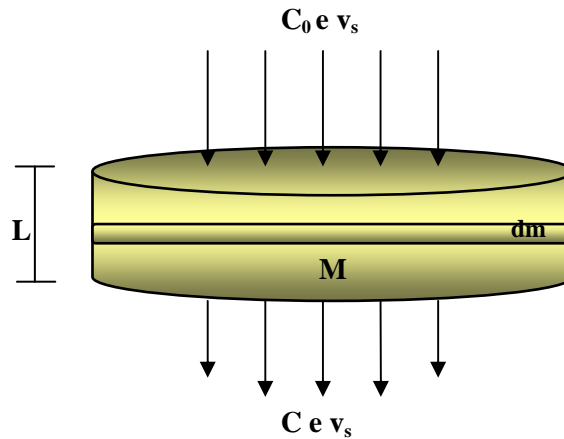


Figura 2.9. Filtração em leito fixo.

Considerando $C=C_0$ para $m=0$ e $C=C$ para $m=M$ e integrando a Equação (2.56) temos a Equação (2.57):

$$\ln \frac{C}{C_0} = \frac{-K_1 \cdot \eta_T \cdot M}{d_C \cdot \rho_C \cdot A} = -\frac{K_1 \cdot \eta_T \cdot V}{d_C \cdot A} \quad (2.57)$$

onde, V o volume total de coletores no leito.

Considerando que o leito tem uma porosidade (ϵ), temos que:

$$V = (1 - \epsilon) \cdot A \cdot L \quad (2.58)$$

onde, L é altura do leito.

Portanto, a Equação (2.42) pode ser escrita através da Equação (2.59), que relaciona a eficiência de coleta total do meio (E) com a eficiência de coleta do coletor isolado (η_T) (BROWN, 1993, FREITAS *et al.*, 2006):

$$E = 1 - \exp \left[\frac{-K_1 \cdot L \cdot (1 - \epsilon) \eta_T}{d_C} \right] \quad (2.59)$$

onde η_T é a eficiência total de coleta de um único coletor dado pela soma de todas as eficiências devido aos mecanismos dada pela Equação 2.41.

2.8 Efeito da temperatura e pressão do gás

A temperatura e a pressão do gás podem afetar a permeabilidade do filtro de duas maneiras. A primeira é a alteração causada pela dependência das propriedades do gás com a pressão ou a temperatura. A segunda refere-se a alterações na própria estrutura do material filtrante. Segundo INNOCENTINI (1997), o aumento da temperatura causou a modificação das propriedades do ar (viscosidade e densidade), alterando a contribuição relativa dos termos inercial e viscoso na equação de ERGUN e na estrutura do filtro provocou uma dilatação térmica com o aumento da temperatura.

Exceto para pressões muito altas (além das usadas correntemente na limpeza de gases quentes) a viscosidade de um gás é efetivamente independente da pressão (REID *et al.*, 1989). Já a viscosidade de um gás (μ) aumenta com a temperatura. Para a maioria dos gases e misturas gasosas, μ pode ser assumido a aumentar proporcionalmente à temperatura absoluta.

A variação na densidade do gás, por sua vez, pode ser obtida diretamente da lei dos gases ideais, desde que novamente o gás ou mistura gasosa não esteja submetido a pressões muito elevadas.

$$\rho(T) = \rho_o \frac{P T_o}{P_o T} \quad (2.60)$$

onde: $\rho(T)$ é a densidade do gás na temperatura absoluta (T) e pressão (P) de interesse e ρ_o é a densidade do gás em uma temperatura absoluta (T_o) e pressão (P_o) de referência.

A influência da temperatura sobre a viscosidade do gás é dada pela relação de Arrhenius (REID *et al.*, 1989).

$$\mu(T) = \mu_o \left(\frac{T}{T_o} \right)^{0,75} \quad (2.61)$$

onde: $\mu(T)$ é a viscosidade do gás na temperatura absoluta (T) e pressão (P) de interesse, no qual T é dado em Kelvin e μ_{ar} em Pa.s e $\mu_o(T)$ a viscosidade do gás na temperatura absoluta de referência (T_o)

A velocidade de filtração também deve ser corrigida pela seguinte equação:

$$v(T) = v_0 \cdot \left(\frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0} \right) \quad (2.62)$$

onde $v(T)$ é a velocidade de filtração nas condições de temperatura (T) e pressão (P) de interesse, v_0 é a velocidade do gás em uma temperatura e pressão de referência.

Segundo CHEUNG (1989) (*apud* INNOCENTINI (1997)), a temperatura e a pressão da corrente gasosa alteram diferentemente os mecanismos de coleta. Na Tabela 2.6 são apresentados os efeitos dessas variáveis sobre os principais mecanismos de coleta de um filtro rígido.

Tabela 2.6. Efeito da temperatura e pressão sobre a coleta de partículas, para os diferentes mecanismos. (CHEUNG, 1989)

Mecanismo	Efeito da Temperatura Elevada	Efeito da Pressão Elevada	Efeito Combinado
Interceptação	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Inercial	Significativamente adverso	Ligeiramente Adverso	Adverso
Difusão	Modestamente favorável	Nenhum	Modestamente Favorável

Pode-se perceber o efeito isolado das variáveis temperatura e pressão sobre a coleta de partículas e o efeito combinado dessas variáveis. A temperatura elevada não provoca efeito algum para o mecanismo interceptação direta, enquanto para o mecanismo inercial o efeito da temperatura é significativamente adverso, ou seja, um aumento na temperatura provoca diminuição na eficiência de coleta. Para o mecanismo difusional o efeito da temperatura é modestamente favorável, ou seja, um aumento da temperatura provoca um aumento da eficiência de coleta (FREITAS *et al.*, 2004).

2.9 Limpeza do Material Filtrante

Como fora dito anteriormente, a operação de filtração consiste basicamente na passagem de um gás contendo o material particulado através de um meio filtrante, tendo como finalidade separar as partículas contidas na corrente gasosa. A queda de pressão no filtro durante o processo de filtração é a diferença entre a pressão da entrada e a pressão na saída do filtro através da passagem do gás pelo meio filtrante, na medida em que a torta é formada dificulta a passagem do gás pelo filtro aumentando a queda de pressão. Após a realização da

filtração, a camada de pó acumulada sobre o filtro, denominada torta de filtração, é que passa a desempenhar o papel de superfície filtrante, é o parâmetro que indica o momento ideal da limpeza e de sua troca (CALLÉ *et al.*, 2002). Entretanto com o acúmulo das partículas, a espessura da torta aumenta, fazendo com que a perda de carga do filtro conseqüentemente aumente, levando a um valor que se torna necessária à limpeza do filtro (TIENI, 2005). Uma limpeza inadequada provoca o acréscimo da queda da pressão residual. Por outro lado, uma limpeza muito vigorosa pode danificar o filtro, reduzindo o período de vida útil do mesmo (LORA, 2002).

As principais técnicas utilizadas na limpeza dos filtros, cada qual adequada a condições específicas de filtração e ao meio filtrante são:

2.9.1 Vibração Mecânica (shaker)

A técnica de limpeza por vibração mecânica é provavelmente a mais antiga técnica de limpeza apresenta uma montagem relativamente simples e um baixo custo de manutenção, sendo apropriada para sistemas de pequeno e médio porte (MOREIRA, 1998) Esta técnica consiste na vibração do meio filtrante por um motor excêntrico a uma frequência de vários pulsos por segundo, gerando uma aceleração no meio que é função da frequência e amplitude do pulso. Pelas suas características de vibração, é um mecanismo indicado para a limpeza de filtros flexíveis como os de tecido. Também é necessária a interrupção do processo de filtração para a realização da limpeza (AGUIAR, 1991).

2.9.2 Fluxo de ar inverso (reverse flux)

Consiste na passagem de um fluxo de ar limpo no sentido oposto ao da filtração até que uma quantidade significativa de pó na torta seja removida. Assim como o método anterior, também possui uma mecanização bastante simples na qual a inversão do fluxo gasoso ocorre pela combinação de válvulas e desvio parcial do ar limpo. A sua vantagem em relação à vibração mecânica é o menor desgaste causado ao meio filtrante, podendo ser utilizado em meios rígidos, porém exige também a interrupção durante a limpeza.

2.9.3 Pulso de gás (ar) inverso (pulse jet)

Este método de limpeza ocorre pela descarga de um pulso de gás comprimido

forçado a passar pela superfície do meio filtrante, porém em sentido contrário. Por meio de uma válvula solenóide ligada a um compressor é possível controlar a frequência e amplitude de cada pulso. A principal vantagem desta técnica é que não é necessária a interrupção da filtração durante a limpeza. Como gás é utilizado normalmente o ar comprimido, mas em aplicações em temperaturas elevadas onde a presença de oxigênio pode resultar em explosão, utiliza-se um gás inerte, como nitrogênio. Na limpeza de gases quentes, a técnica de pulso inverso é a preferida, pelas vantagens acima citadas (INNOCENTINI, 1997).

Alguns estudos foram efetuados levando em consideração a limpeza de gás em filtros cerâmicos utilizando pulso reverso. Todos estes estudos mostraram que a pressão e os perfis de velocidade utilizados na limpeza normalmente não são uniformemente distribuídos ao longo do elemento de filtro, ocasionando em uma limpeza ineficiente na área real do escoamento (CHUAH, *et al.*, 2004).

Durante a operação da filtração, devido à regeneração incompleta do filtro, a curva de filtração muda de comportamento após a primeira regeneração. Cada vez que a torta de filtração é removida da superfície do filtro, a camada residual sofre um rearranjo causado pelo pulso de ar de limpeza.

O condicionamento do filtro é o termo usado para designar a tendência à estabilização da permeabilidade do filtro com as alterações na estrutura da camada residual. A maioria das partículas é expelida, outras são apenas deslocadas e algumas comprimidas dentro da estrutura porosa. A complexidade é ainda maior se o processo de filtração ocorrer em temperaturas elevadas. Nesse caso, as forças de adesão e coesão podem ser aumentadas, à medida que se aproxima a temperatura de fusão da partícula (*softening*). A predominância de um mecanismo ou de outro determina a estabilidade ou não da camada residual. Uma camada residual estável é aquela que não apresenta alterações em sua estrutura após um certo número de ciclos de filtração e limpeza. A estabilização é verificada pela constância com o tempo da queda de pressão de regeneração (ΔP_{re}). Alternativamente, ΔP_{re} pode ser expresso em termos da *permeabilidade (Darciana) de regeneração do filtro* ($k_{1,r}$), definida como:

$$k_{1,r} = \frac{\mu v_s}{\Delta P_{re}} \quad (2.63)$$

A Figura 2.10 apresenta esquematicamente uma curva de condicionamento do filtro e a definição dos termos importantes (INNOCENTINI, 1997).

O tempo de vida útil de um elemento filtrante é determinado pelo número de ciclos em que sua queda de pressão (ou permeabilidade) de regeneração fica dentro de uma faixa aceitável economicamente. A curva de condicionamento é extremamente dependente das propriedades da partícula, das condições de operação e da estrutura do filtro. Partículas pequenas ou pouco coesivas tendem a gerar uma camada residual pouco permeável, aumentando a queda de pressão final do filtro. O mesmo é válido para altas velocidades de filtração e estruturas filtrantes com porosos grandes. Uma limpeza pouco eficiente também pode resultar em um maior número de ciclos para o condicionamento ser atingido (FREITAS, 2003).

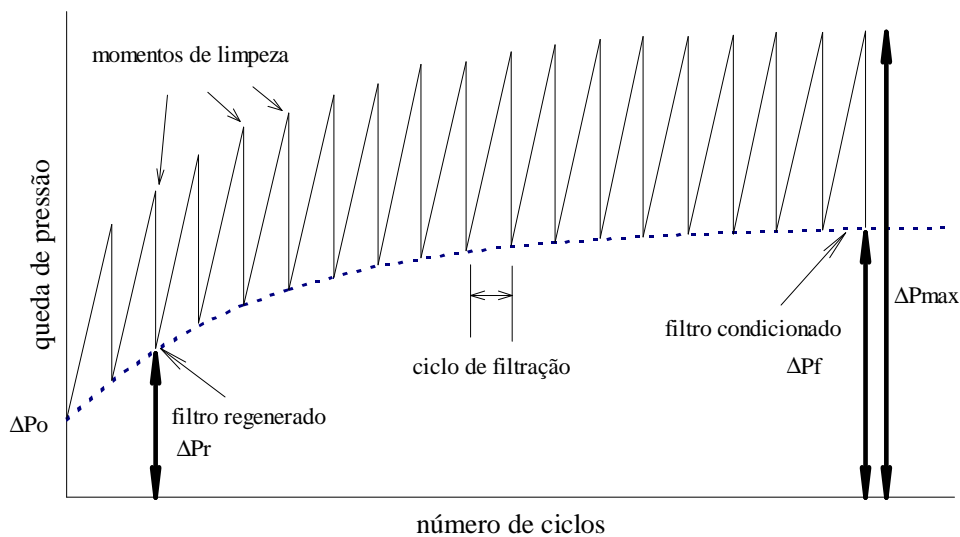


Figura 2.10. Diagrama esquemático de condicionamento do filtro (INNOCENTINI,1997).

Para avaliar a capacidade do meio filtrante a recuperar suas características iniciais, SCHMIDT *et al.* (1986) reportam a seguinte relação:

$$R = \frac{\Delta P_{\max} - \Delta P_r}{\Delta P_{\max} - \Delta P_o} \cdot 100\% \quad (2.64)$$

onde ΔP_{\max} é a queda de pressão máxima imediatamente antes da limpeza, ΔP_o é a queda de pressão do filtro virgem.

Este fator é importante, pois dá uma idéia do momento em que o processo de filtração/limpeza atinge o estado estacionário e o grau de regeneração do filtro. Sendo bastante

útil na comparação entre elementos filtrantes, diferentes entre si.

2.10 Trabalhos a Altas Temperaturas

O interesse sobre o comportamento dos filtros cerâmicos para trabalhos em altas temperaturas conduziu em resultados de trabalhos experimentais. Apesar dos filtros cerâmicos estarem estabelecidos comercialmente, é observado uma falta de uma teoria mais aplicável para descrever o seu desempenho, visto que os filtros cerâmicos são responsáveis por mais de 80% do espaço dedicado na literatura. O material citado a seguir apresenta informações sobre o uso destes filtros na remoção de material particulado em altas temperaturas.

INNOCENTINI em 1997, testou filtros fibrosos comerciais ($\epsilon \cong 0,8$) e obteve valores médios experimentais de k_1 e k_2 de $1,72 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ e $2,04 \times 10^{-6} \text{ m}$, respectivamente. O autor estudou os filtros cerâmicos rígidos de duas camadas em trabalhos com altas temperaturas e comparou-os com filtros fibrosos e granulares. Ele verificou que os filtros de dupla camada foram mais permeáveis do que os filtros fibrosos. A avaliação global mostrou que os filtros de dupla-camada apresentaram desempenho superior ou semelhante aos filtros fibrosos e granulares testados em idênticas condições de operação.

PEUKERT em 1998, estudou filtros cerâmicos fibrosos de alumina/sílica ($\epsilon \cong 0,85$, espessura de 20mm, diâmetro da fibra de $4\mu\text{m}$, diâmetro do meio filtrante=150 mm) em ensaios de filtração variando a temperatura desde ambiente até 600°C . A velocidade de filtração variou de 1 a 2,5 m/min. A concentração do pó foi de $1\text{g}/\text{m}^3$ de sílica e $25\text{g}/\text{m}^3$ de quartzo. Os resultados obtidos demonstraram que o meio cerâmico fibroso foi extremamente eficiente em todas as condições de operação.

MANIERO em 2003 estudou a eficiência de coleta na filtração de gases a altas temperaturas, utilizando-se filtros cerâmicos de dupla camada. Os experimentos foram realizados variando-se as temperaturas desde a ambiente até 650°C , as velocidades de 5 a 15 cm/s e o tempo de filtração de 5 a 30 min. Os resultados mostraram que as eficiências de coleta globais obtidas foram altas, superiores a 97,5% em todos os testes, com uma queda de pressão aceitável. A autora verificou que a eficiência de coleta diminui com o aumento da temperatura e da velocidade superficial do gás e aumentou com o decorrer do tempo. Valores teóricos de eficiência de coleta, calculados através de correlações existentes na literatura para filtros granulares, foram comparados com os dados experimentais obtidos e mostraram que as

correlações utilizadas previram qualitativamente a dependência da eficiência com a temperatura, mas subestimaram a capacidade de coleta do filtro.

FREITAS *et al.*, 2006 estudou o desempenho dos filtros cerâmicos de dupla camada para a filtração de aerossóis em temperaturas elevadas e avaliou a eficiência de coleta para diâmetros de partícula entre 0,4 e 8,5 μ m. Este filtro é composto pela combinação de duas camadas, sendo a primeira formada por um suporte reticulado de elevada porosidade e diâmetro de poro controlado que tem a função de dar estabilidade mecânica para a segunda camada depositada sobre uma das faces. Esta segunda camada é formada por uma película fina filtrante ou membrana granular. Os testes de permeabilidade foram realizados em uma ampla faixa de velocidade superficial (1,5 a 22,5 cm/s) e temperaturas (20 a 700°C) e os testes de filtração em três níveis de temperatura (ambiente, 300°C e 700°C) numa velocidade de 10 cm/s. Os resultados mostraram que os filtros apresentaram alta eficiência de coleta (>96,5%), comparados com outros filtros cerâmicos na literatura. Os autores observaram que a eficiência diminuiu com o aumento da temperatura e aumentou com o diâmetro da partícula e ao longo do tempo. Os autores propuseram uma correlação para a eficiência de coleta fracionária representada pela Eq. 2.65:

$$E = 1 - \exp\left[\frac{-a.K_1.L.(1-\varepsilon)\eta_T}{d_c}\right] \quad (2.65)$$

onde 'a' é uma constante ajustada de valor 46,4.

As mudanças com a temperatura no trabalho de FREITAS *et al.*, 2006 foram baseadas em uma relação experimental em relação ao cálculo da porosidade (ε) na forma linear dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = 0,33 + 9,77 \times 10^{-5} T \quad (2.66)$$

A correlação proposta segundo a autora representou bem o comportamento experimental respondendo de forma satisfatória às mudanças nas condições experimentais com a variação da temperatura.

De acordo com as informações apresentadas na literatura pode-se verificar que existe um estudo constante na busca do desenvolvimento de novos materiais para trabalhos a altas temperaturas. Desenvolvidas a partir da década de 60, as estruturas cerâmicas tiveram atuação destacada nos anos 80 na filtração de metais líquidos. No entanto, conquistaram definitivamente seu espaço nos últimos 10 anos, quando têm sido utilizadas na combustão catalítica, filtração de aerossóis, recuperação de vapor e no reaproveitamento de energia solar (INNOCENTINI, 1997).

Foi verificado que a permeabilidade, eficiência de coleta e resistência mecânica são os parâmetros utilizados para aperfeiçoar o processo de manufaturas dos meios filtrantes. As complexas interações entre partículas e meio filtrante, dependem também das condições de operação e do tipo do material particulado envolvido no processo. Existem trabalhos que levam também em consideração as propriedades do material particulado, como forma, coesividade, adesão e distribuição granulométrica, parâmetros importantes na filtração e limpeza de gases a altas temperaturas. Todos esses aspectos precisam ser considerados no desenvolvimento dos meios filtrantes.

Verificado a importância atual de um sistema de limpeza de gases quentes e eficientes todo esse estudo se faz mais do que nunca necessário. Neste sentido os filtros cerâmicos se destacam com um grande espaço dedicado na literatura como a tecnologia promissora na remoção de particulados a altas temperaturas, devido as excelentes propriedades de filtração e viabilidade econômica no processo de fabricação e manutenção.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Neste capítulo encontram-se descritos os principais componentes do aparato experimental utilizado para a execução do trabalho experimental. Essa descrição envolve a caracterização do material filtrante, além de abordar as técnicas de manipulação, normas, procedimentos e materiais específicos necessários para a concretização do presente trabalho. O trabalho experimental desenvolvido nesta tese foi realizado no Departamento de Engenharia Química - Laboratório de Controle Ambiental na Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, com o objetivo da montagem do aparato para os ensaios a altas temperaturas de até 700°C, caracterização dos meios filtrantes, ensaios aerodinâmicos e filtração em temperaturas elevadas.

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1 Material Particulado

O material pulverulento usado na geração do aerossol nos ensaios de filtração foi o concentrado fosfático de Patos de Minas (MG) fornecido pela FOSFÉRTIL S.A. de Patos de Minas-MG, cuja composição química é apresentada na Tabela 3.1. A Figura 3.1 apresenta a imagem do material pulverulento obtida em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com ampliação de 3500 vezes.

Tabela 3.1. Composição química do material particulado usado na geração do aerossol (INNOCENTINI, 1997).

Substância	Massa relativa (%)
CaO	32,20
P ₂ O ₅	24,80
F ⁻	2,00
F ₂ O ₃	2,44
I ₂ O ₃	5,00
Cl ⁻	0,11
SiO ₂	28,10
K ₂ O	1,24
Na ₂ O	0,13
MgO	0,51

O concentrado de rocha fosfática empregado nos experimentos passou por um tratamento prévio. Por apresentar partículas em uma grande faixa de tamanhos, o pó da rocha

foi peneirado a úmido em peneira de 400 mesh. Esta etapa consistiu na passagem de água através da peneira, sendo aproveitada a fração passante, deixava-se o material sedimentar para retirar o excesso de água com o uso de um sifão. O material foi colocado em uma estufa a 100° C por 24 horas. Após a secagem, toda a retirada de água, os blocos secos de pó de rocha foram colocados em moinho de bolas por um período de 10 horas.

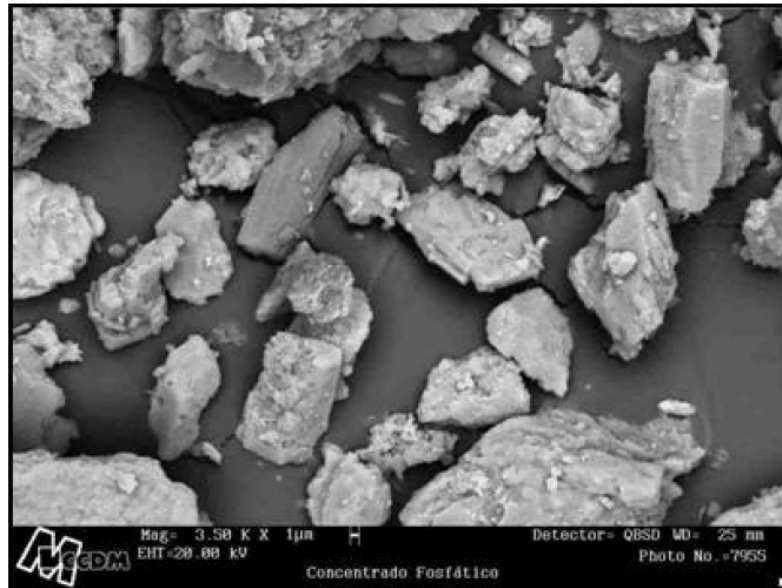


Figura 3.1. Imagem do concentrado fosfático obtida no MEV com ampliação de 3500 vezes.

A caracterização do material particulado, densidade e granulometria foram realizadas em picnômetro a gás Hélio, Accupyc, Modelo 1330 da Micromeritics e em contador óptico de partículas Hiac/ Hoyco modelo 5230, que fornece o número de partículas em função do diâmetro aerodinâmico das mesmas. Este pó apresentou uma densidade de $\rho_p = 2970 \text{ Kg/m}^3$. A Tabela 3.2 apresenta a distribuição granulométrica do material particulado.

A Figura 3.2 mostra a distribuição granulométrica do material particulado através da massa acumulada em função do diâmetro da partícula. O diâmetro aerodinâmico mediano do concentrado fosfático foi de $4,62\mu\text{m}$. O diâmetro médio das partículas foi determinado pelo equipamento Malvern Mastersizer Microplus.

Um ensaio realizado por Innocentini (1997) verificou a estabilidade do concentrado fosfático de Patos de Minas. Mantendo uma amostra do material a uma temperatura de 1000°C por 5 horas, constatou-se que não houve qualquer alteração em sua massa e coloração, indicando desta forma a estabilidade nas condições de filtração usadas neste trabalho.

Tabela 3.2. Análise granulométrica do material particulado.

Faixa de diâmetro (μm)	Diâmetro médio d_p (μm)	Massa (%)	Massa Acumulada (%)
0,5-1,0	0,75	1,27	1,27
1,0-2,0	1,5	4,81	6,08
2,0-3,0	2,5	9,32	15,40
3,0-4,0	3,5	16,65	32,05
4,0-5,0	4,5	25,24	57,29
5,0-7,0	6,0	23,72	81,01
7,0-10,0	8,5	14,48	95,49
10,0-15,0	12,5	4,51	100,00

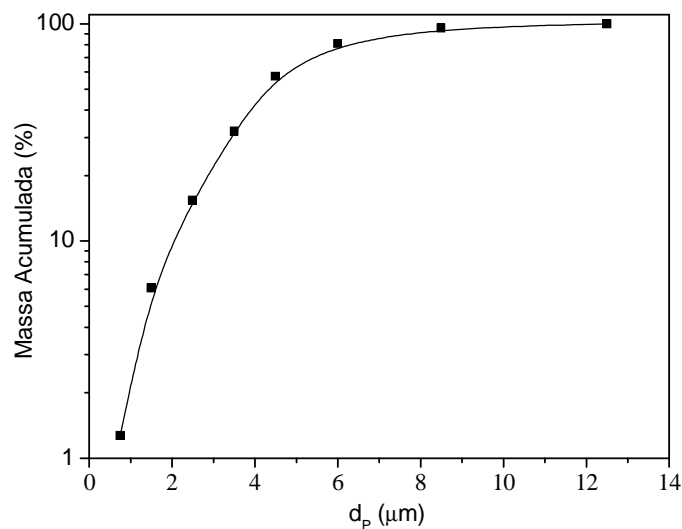


Figura 3.2. Distribuição granulométrica das partículas do concentrado fosfático obtida no contador óptico de partículas Hiac/Hoyco no DEQ-UFSCar.

3.1.1.1 Sistema de dispersão do aerossol

O gerador de pó do tipo leito fluidizado (Figura 3.3) de pequena escala (TSI-3400) usado para dispersar o pó seco abrangendo um diâmetro de 0,1 a 20 μm . A ação dos grânulos grandes no leito fluidizado separa os aglomerados das partículas finas do pó. A concentração na saída é relativamente estável quando comparada com a maioria de outros dispositivos para dispersão da poeira seca. O gerador de aerossol pode manter a concentração estável do pó por um longo período. Na operação básica, o pó é alimentado dentro do leito

fluidizado por uma corrente de grânulos de velocidade variável. A movimentação contínua do material do leito (arame ou grânulos de bronze) desaglomera o pó. O ar filtrado abaixo do leito carrega as partículas do pó na saída. Um ciclone de aço inoxidável de 0,5 in é fornecido com o equipamento padrão. Com uma vazão de 9L/min, o ciclone permite que somente o pó respirável passe a ser gerado. As condições de operação utilizadas na geração do pó foram à velocidade da corrente de grânulos em 40%, a purga de 50% e o leito fluidizado de 70%.



Figura 3.3. Gerador de pó do tipo leito fluidizado de pequena escala modelo TSI 3400.

3.1.2 Meios Filtrantes

3.1.2.1 Filtro de Microfibra de Quartzo

As informações foram fornecidas pelo fabricante Energética, e algumas características a respeito do filtro são apresentadas na Tabela 3.3.

O filtro de microfibra de quartzo (SiO_2), também denominado cristal de rocha, utilizado, apresentou eficiência superior a 99 % na retenção de aerossóis de DOP (ftalato de dioctil) na temperatura ambiente, com diâmetro acima de $0,3 \mu\text{m}$ (teste ASTM-2986), baixíssima higroscopia, presença desprezível de material aglutinante e resistência a temperaturas de até $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$. Com traços metálicos baixíssimos e reduzida adsorção de dióxidos nitrosos e sulfurosos. Retangular, com $203 \text{ mm} \times 254 \text{ mm}$, utilizado principalmente em amostragem de grande volume (AGV) de partículas totais em suspensão (PTS) no ar

ambiente. É similar aos filtros QM-A da Whatman e microquartzo da Gelman.

Tabela 3.3. Características do Filtro de microfibras de quartzo (EQR8X10IN), fornecido pelo fabricante. (Energética)

CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS	
Gramatura (g/m^2)	80
Espessura (mm)	0,5
Retenção de partículas:	
• Líquidas	1,5
• Eficiência DOP	99,9
• Perda de carga ($\text{mmH}_2\text{O}/5\text{cm/s}$)	48
TRAÇOS METÁLICOS (ppm)	
Ferro (Fe)	10
Níquel (Ni)	<0,5
Manganês (Mn)	<0,5
Cromo (Cr)	<1
Chumbo (Pb)	<1
Zinco (Zn)	4,9
Cádmio (Cd)	0,1
Cobre (Cu)	3,4
Cálcio (Ca)	200
Magnésio (Mg)	<0,1
Sódio (Na)	270
Potássio (K)	42

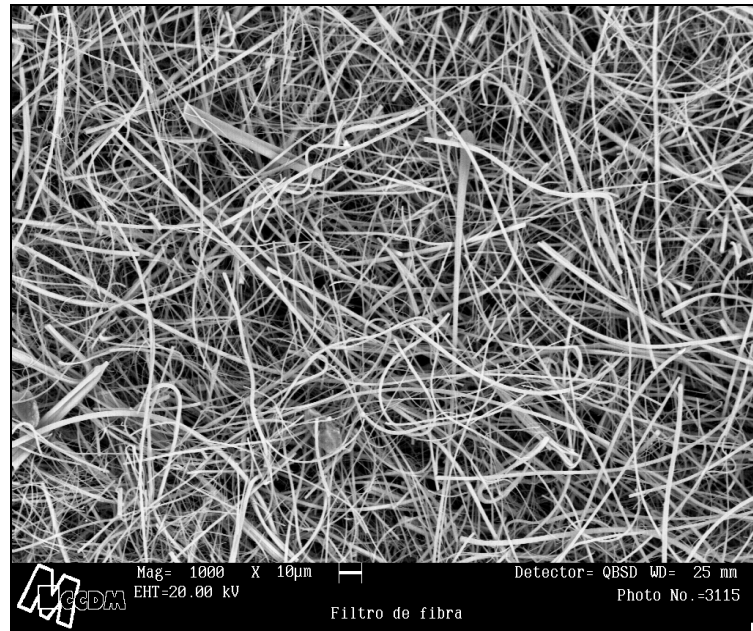
3.1.2.1.1 Caracterização Física do Filtro de Microfibras de Quartzo

Para os testes, o filtro tinha formato circular, com 6 cm de diâmetro e espessura equivalente a 0,5mm. O filtro de microfibras de quartzo foi caracterizado quanto à porosidade (ϵ) e diâmetro de fibra.

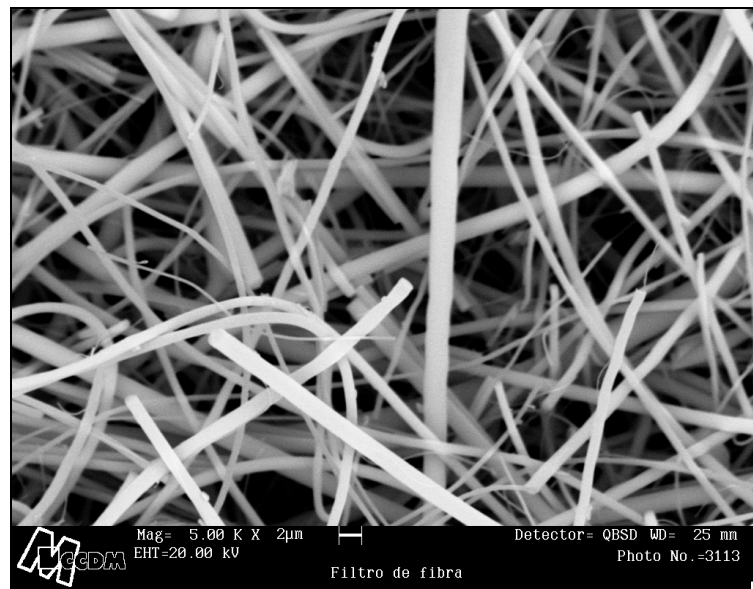
A porosidade do meio filtrante foi determinada por porosimetria de Mercúrio (Quantachrome Poremaster). O diâmetro das fibras foi medido por análise das imagens (Image pro-plus 3.0 for Windows). Para visualização no microscópio eletrônico de varredura (MEV), foi necessário a priori, um tratamento do filtro utilizado nos ensaios de filtração, composto por várias etapas detalhadas em Anexo A.

As microfotografias obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram obtidas no CCDM (Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais)–

UFSCar (Figura 3.4). O teste baseia-se na análise de fotografias ou micrografias da superfície da estrutura, onde é calculado um diâmetro médio através do contraste de cor, tomando como filtro à região de tom claro.



(a)



(b)

Figura 3.4. Vista superior do filtro de microfibra de quartzo a) com ampliação 1000 vezes b) com ampliação de 5000 vezes.

A Tabela 3.4 apresenta valores de porosidade e diâmetro da fibra do filtro de microfibra de quartzo utilizada.

Tabela 3.4. Porosidade, diâmetro médio da fibra e espessura do filtro de microfibras de quartzo estudados.

Filtro de microfibras de quartzo	ϵ (-)	d_{fibra} (μm)	Espessura, L(m)
	0,698	1,09	0,0005
	$\pm 0,015$	$\pm 0,08$	

3.1.2.2 Filtros Cerâmicos Fibrosos Silico-Aluminosos A1000, B1000, B750, 1A, 2D, 3D e 5A.

Os filtros cerâmicos fibrosos foram confeccionados pelo Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC. Os filtros com estrutura de fibras foram preparados a partir de mantas refratárias silico-aluminosas comerciais (Tecnotermo Isolantes) podem ser obtidos mais detalhes de sua confecção em RAMBO *et al.*, 2007.

Foram confeccionados três filtros, nos quais foram variadas composição e a temperatura de sinterização, sendo denominados A1000 e B1000, sinterizados a 1000 °C e B750, sinterizados 750 °C. As amostras tinham a forma de disco com 6 cm de diâmetro. Para os testes de permeabilidade e filtração foram confeccionados quatro filtros denominados por 1A, 2D, 3D e 5A, todos sinterizados a 1350 °C e mesma composição. As amostras tinham a forma de disco com 6 cm e espessura de ~1 cm. O diâmetro efetivo de escoamento foi de 3 cm. A Tabela 3.5 apresenta valores de porosidade e diâmetro destes filtros.

Tabela 3.5. Porosidade, diâmetro médio da fibra e espessura dos filtros cerâmicos fibrosos.

Filtro Cerâmico Fibroso	Porosidade, ϵ (-)	d_{fibra} (μm)	Espessura, L(m)
Filtro A1000	0,5400	5	0,0100
Filtro B1000	0,5700	5	0,0097
Filtro B750	0,6800	5	0,0100
Filtro 1A	0,6552	5	0,0097
Filtro 2D	0,7303	5	0,0098
Filtro 3D	0,6516	5	0,0094
Filtro 5A	0,5000	5	0,0112

Os filtros cerâmicos fibrosos foram caracterizados quanto à porosidade (ϵ) e diâmetro de fibra. A porosidade aparente foi calculada da relação entre densidade real e densidade geométrica. A densidade real das amostras foi determinada por picnometria de hélio (AccuPyc 1330, Micromeritics). A morfologia e as microestruturas das fibras foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (SEM, XL-30, Philips) (Figura 3.5) na

UFSC.

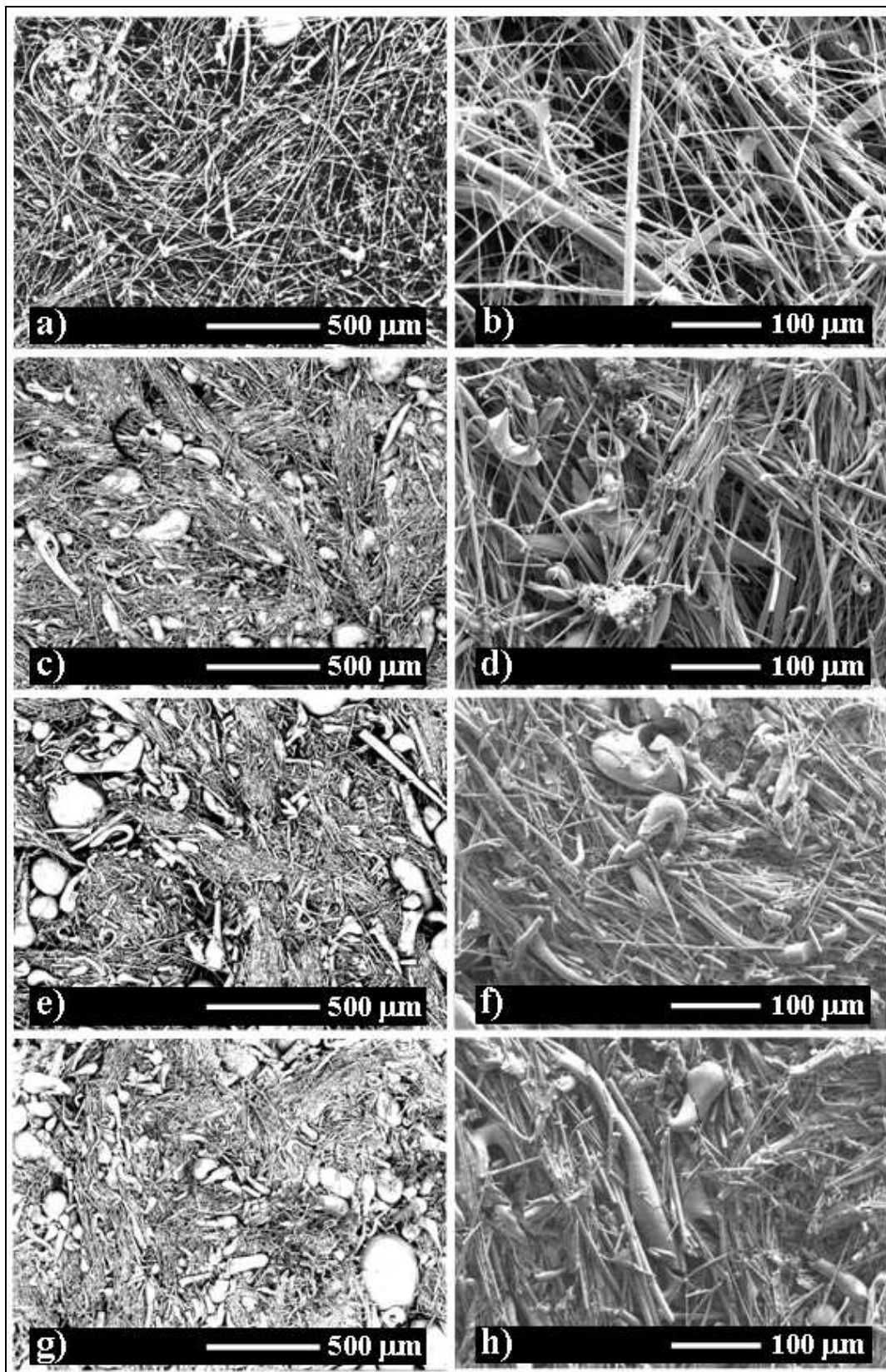


Figura 3.5. Microestrutura dos filtros cerâmicos fibrosos: a),b) não sinterizados; c), d) 73% e), f) 65%, g), h) 50%.

3.1.2.3 Filtro Cerâmico Celular de Alumina A12 e A13

Os filtros cerâmicos celulares (Amostra 12 e 13) foram confeccionados pelo Departamento de Engenharia Civil da USP (Figura 3.6).

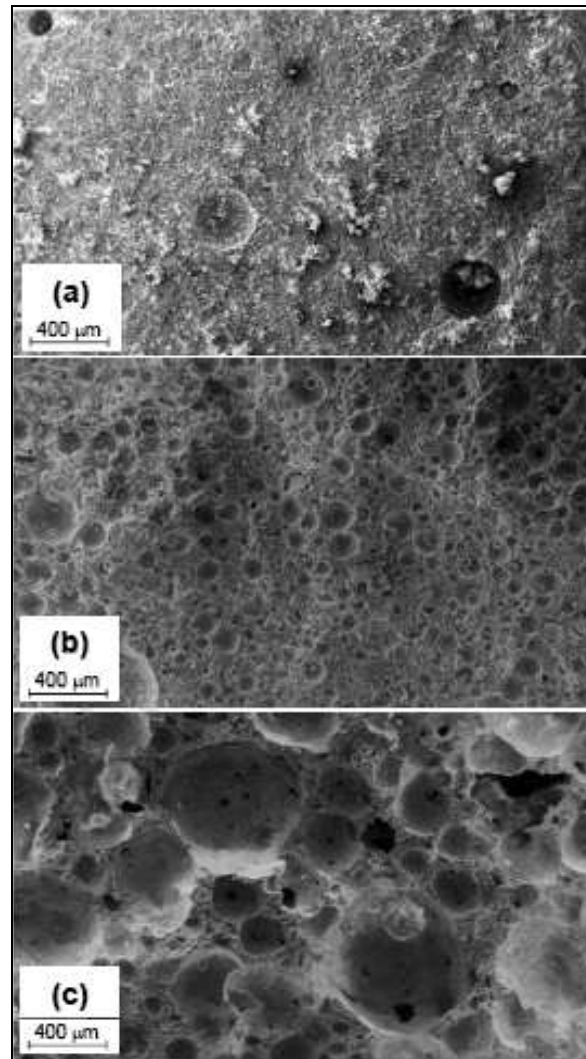


Figura 3.6. Microestrutura do filtro cerâmico com ampliação de 400 vezes.

As amostras cerâmicas foram preparadas com a incorporação da espuma aquosa em uma suspensão de alumina. As suspensões cerâmica compostas de água e pós providos de ALCOA – USA (Aluminas A17 NE (5.5%), CT3000 SG (35.6%), Hidrogard (13.7%)). Uma quantidade pequena de poliácido de sódio (1%) e acetato-co-etileno de polivinil (4.0%) também foi introduzido na suspensão. A amostra A13 recebeu ainda a adição de 0,05% de fibras celulósicas para aumentar conectividade de poro. Para a preparação da suspensão cerâmica, os pós e a parte do líquido foram misturados (misturador de IKA,

Labortechnik RW 20M) em 500 rpm e passados então com o líquido restante através de um dispersador alta-tensão (IKA, Labortechnik - T25 básico) em 9500 rpm.

A espuma foi preparada misturando todos os ingredientes em alta rotação até a consistência desejada. A suspensão e a espuma cerâmicas foram misturadas então junto em proporções diferentes de volume sob a mistura delicada para evitar mudanças na distribuição de tamanho da bolha. Finalmente, o agente do ajuste foi adicionado sob a mistura por alguns segundos em 800rpm. Após a secagem de 24 h em condições ambientes, as amostras foram sinterizadas em 1200°C por 2 h, com uma taxa de aquecimento de 5°C/min.

As amostras em forma de discos apresentavam diâmetro de 5 cm. O diâmetro efetivo de escoamento foi de 3 cm. Maiores detalhes de sua confecção podem ser obtidos em RODRIGUES *et al.*, 2008. As amostras foram analisadas quanto à porosidade (ϵ) e diâmetro de poro (d_{poro}). A porosidade foi obtida através de método de deslocamento de água, baseado no princípio de Arquimedes e a distribuição do poro através do Porosímetro de mercúrio (Micromeritics, Poro Automático modelo III) na UNAERP. A Tabela 3.6 apresenta valores de porosidade e diâmetro do poro para os filtros utilizados neste trabalho.

Tabela 3.6 Porosidade, diâmetro médio do poro e espessura dos filtros cerâmicos celulares.

Filtro Cerâmico	Porosidade, ϵ (-)	d_{poro} (μm)	Espessura, L(m)
Filtro A12	0,621	0,33	0,0085
Filtro A13	0,680	0,67	0,0098

3.2 Caracterização Aerodinâmica

3.2.1 Ensaios de Permeabilidade dos Filtros

A unidade disponível para análise aerodinâmica na Universidade Federal de São Carlos permitiu a realização de ensaios em uma ampla faixa de temperatura (ambiente a 700°C). O equipamento utilizado consistiu de um soprador (7,5 HP) que fornecia a vazão de ar necessária ao experimento; um rotâmetro para medir vazão máxima de até 40 l/min; um micromanômetro (FCO14, Furness Control) para medir a perda de carga antes e depois do filtro; um forno (Maitec, 7500W) conectado a um controlador de temperatura do tipo PID (Flyever); termopares Tipo K localizados na entrada e na saída próximos à amostra, sendo a

leitura da temperatura feita em um leitor de temperatura (SK5, Salcas); um permeâmetro (Figura 3.8) dividido em duas seções cilíndricas, confeccionadas em aço refratário, entre as quais era acoplada um porta amostra cilíndrico, também de aço refratário.

As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 mostram detalhes do sistema experimental para avaliação da permeabilidade nos filtros.

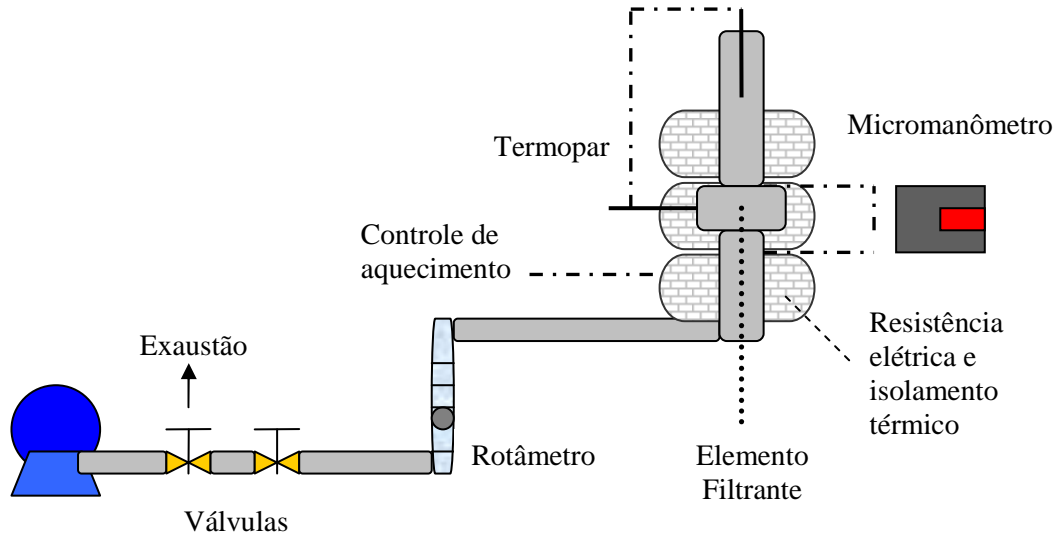


Figura 3.7. Esquema do sistema experimental para avaliação da permeabilidade dos filtros cerâmicos.

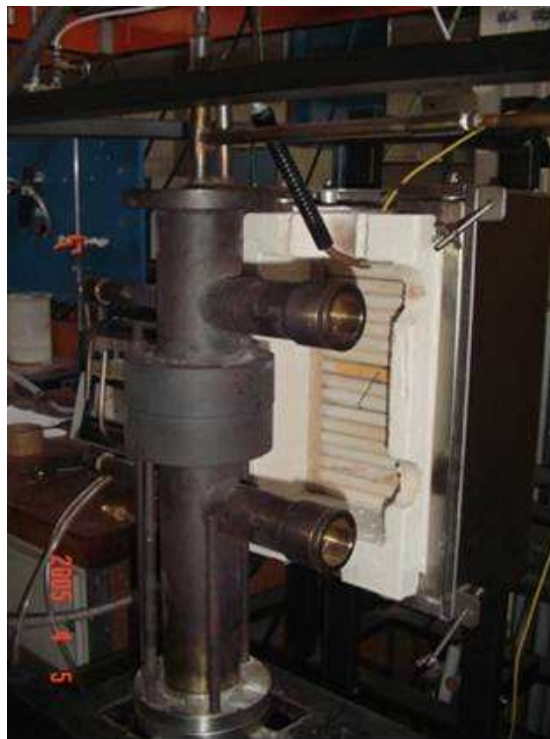


Figura 3.8. Fotografia do permeâmetro acoplado à manta de aquecimento.

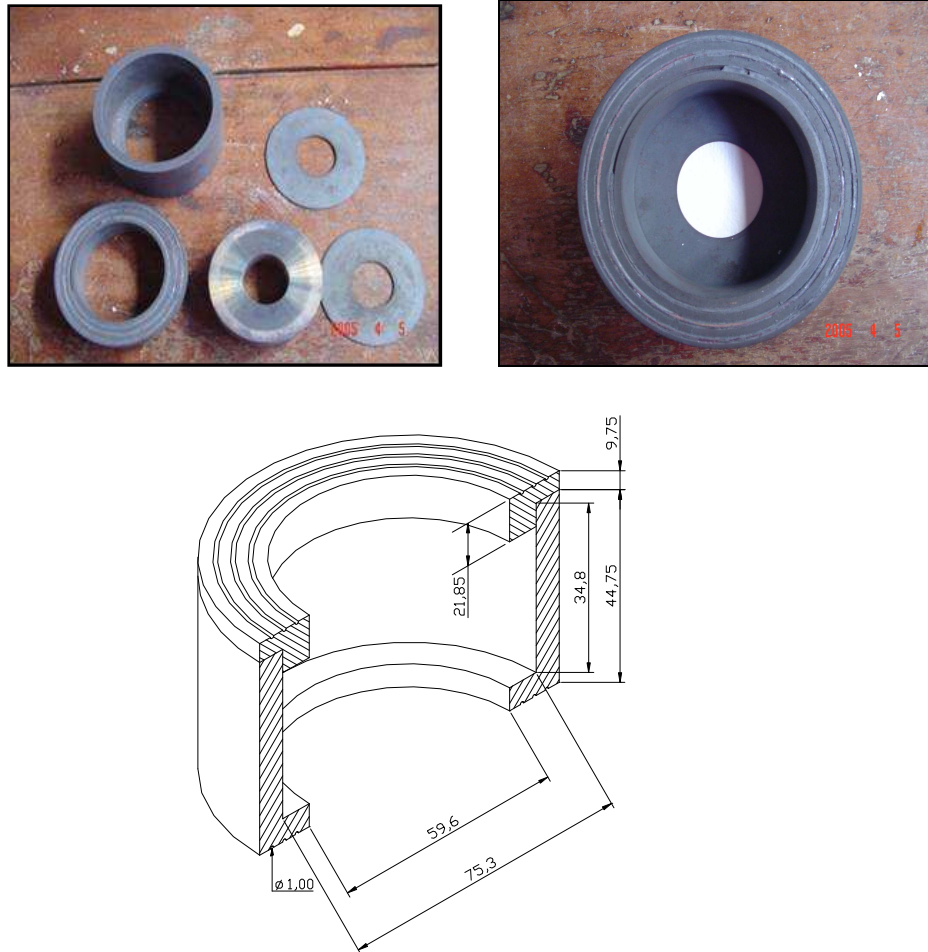


Figura 3.9. Fotografia e configurações do porta amostra aonde foi mantido fixo o meio filtrante utilizado nos experimentos. Valores da unidade da figura em milímetros.

A amostra, em forma de disco com aproximadamente 6 cm de diâmetro e espessuras de 0,5 a 10 mm foi colocado no porta amostra entre as secções cilíndricas e posteriormente vedadas. Na borda lateral da amostra foi colocada uma manta para evitar o escoamento radial do ar e vedar a amostra evitando o escape do fluido. O aquecimento do ar foi realizado na própria câmara de ensaios através de um forno acoplado a um controlador de temperatura. O controle da temperatura foi feito através de dois termopares do tipo K que foram inseridos perpendicularmente dentro do forno, sendo um abaixo e outro acima da amostra.

Um soprador fornecia a vazão do ar necessária. O controle da vazão foi feito por válvulas e acompanhado em um rotâmetro. A velocidade superficial do gás foi obtida através da razão entre a vazão volumétrica de ar, que foi medida pelo rotâmetro, e a área da secção transversal ortogonal ao escoamento. A vazão registrada no rotâmetro foi corrigida para a temperatura e pressão de operação. Para testes realizados em altas temperaturas as

mudanças nas propriedades do fluido devem ser consideradas para avaliar as constantes de permeabilidade. Como a vazão do gás foi medida à temperatura ambiente e à pressão do local do controlador e o meio poroso está à temperatura de teste, a propriedade do escoamento devem ser corrigidas para as condições do teste.

O procedimento para determinação da permeabilidade consistia na passagem do ar através da amostra. Os filtros foram analisados quanto à permeabilidade em uma ampla faixa de temperatura (ambiente a 700°C) e de velocidade superficial (0,01 a 1,8 m/s). A temperatura foi inicialmente ajustada e foram medidos os valores de queda de pressão em função da velocidade superficial (v_s). Para cada amostra foram feitas tréplicas das curvas experimentais da queda de pressão em função da velocidade.

3.2.2.1 Cálculo das constantes de permeabilidade

Os dados de permeabilidade para os filtros foram obtidos pela Equação 2.2, conhecida como equação de Forchheimer para fluidos compressíveis (gás ideal), no qual a queda de pressão através do meio poroso descreve uma dependência não-linear com a velocidade do fluido.

Para os testes realizados em altas temperaturas, as mudanças nas propriedades do fluido foram consideradas para avaliar as constantes de permeabilidade. A densidade do gás normalmente é obtida da lei dos gases ideais, como mostra a Equação 3.1.

$$\rho(T) = \frac{3,488 \times 10^{-3} P}{T} \quad (3.1)$$

onde, $\rho(T)$ é a densidade do gás nas condições de temperatura e pressão de interesse; ρ_0 é a densidade do gás em uma temperatura e pressão de referência. A influência da temperatura sobre a viscosidade do gás foi dada pela Equação 3.2 conhecida como equação de SUTHERLAND (DELMÉE, 1983).

$$\mu_{ar}(T) = 1,73 \times 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,5} \left(\frac{398}{T + 125} \right) \quad (3.2)$$

onde: T é a temperatura dada em Kelvin e μ_{ar} em Pa.s. A velocidade do ar também foi corrigida através da Equação 2.62.

3.3. Ensaio de filtração.

O equipamento utilizado nos ensaios de filtração consistia de uma linha de ar comprimido, o gerador de aerossol do tipo leito fluidizado (TSI-2300), um rotômetro de vidro para controle da vazão, um manômetro e a câmara de ensaio. Os ensaios de filtração foram realizados através de alterações no equipamento para caracterização aerodinâmica. O equipamento permitia testes de até 800°C. Detalhes do sistema utilizado para os ensaios de filtração são esquematizados na Figura 3.10. Para os testes, a área real de filtração foi de 7cm². A Tabela 3.7 apresenta as condições de operação utilizadas nos ensaios de filtração para os filtros testados.

Tabela 3.7. Condições de operação dos ensaios de filtração.

Dados Operacionais	
Fluido	Ar
Material Particulado	Rocha Fosfática
Diâmetro Médio Partícula (µm)	4,62
Densidade da Partícula (kg/m ³)	2970
Velocidade de Filtração (m/s)	0,05
Concentração Material Particulado (kg/m ³)	1,74. 10 ⁻⁵
Temperatura (°C)	amb; 300; 700

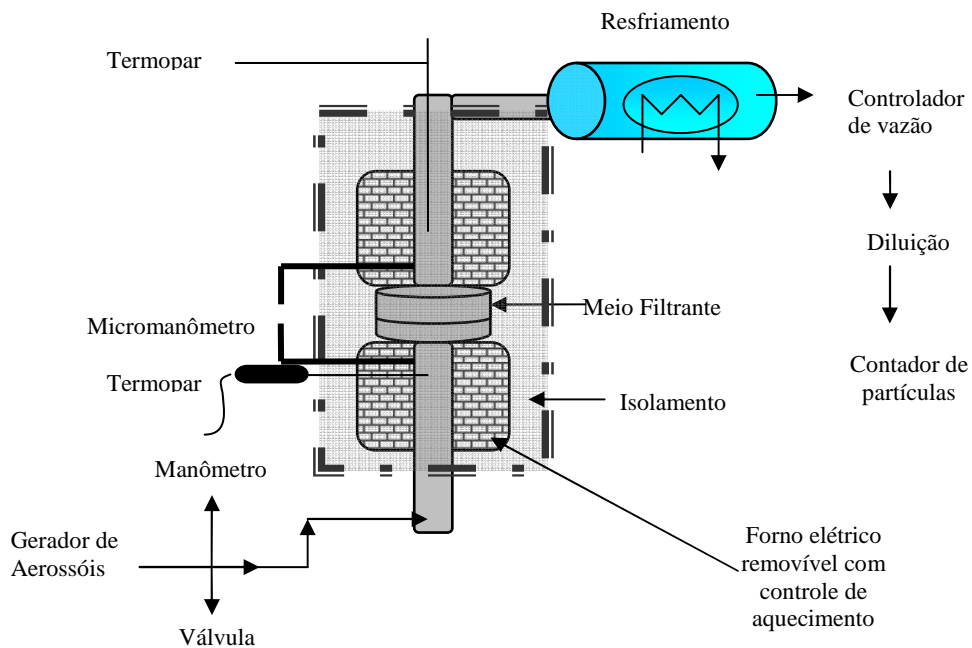


Figura 3.10. Esquema do sistema experimental para avaliação da filtração dos filtros utilizados nos experimentos.

Inicialmente, o elemento filtrante foi inserido no porta-amostra adaptadas a um

suporte fixo e o forno fechado. O aquecimento do ar foi realizado na própria câmara de ensaios por meio de um forno acoplado a um controlador do tipo PID. A temperatura foi medida por meio de dois termopares do tipo K, sendo a leitura da temperatura feita em um leitor de temperatura (SK5, Salcas), que foram inseridos dentro do forno sendo um abaixo e outro acima da amostra. O elemento filtrante utilizado nos experimentos era virgem. Foram anotadas a temperatura e pressão ambiente para a correção dos parâmetros aerodinâmicos (vazão, densidade e viscosidade do gás). Antes de injetar o material particulado no sistema de filtração primeiramente foram verificados possíveis vazamentos. Após isso, a linha de ar comprimido foi aberta, o gerador de aerossol foi ligado para a estabilização da concentração de particulados e fixava-se a vazão desejada no rotâmetro. O controle da vazão de pó injetado no sistema foi feito diretamente no gerador.

Após 10 minutos, iniciava-se o experimento, acionando-se o cronômetro e inserindo o aerossol no sistema de filtração. A alimentação do aerossol foi feita por um gerador do tipo leito fluidizado. O aerossol gerado foi alimentado diretamente na região de aquecimento.

A cada minuto anotava-se a queda de pressão no filtro. Para a contagem das partículas que atravessaram o filtro, conectava-se a mangueira do Royco à saída desse, a cada 5 minutos e o ensaio encerrava-se aos 20 minutos. Uma vez que a queda de pressão causava uma diminuição na vazão, foram feitos ajustes periódicos nas válvulas, para a manutenção da velocidade superficial do gás permaneceu constante. Encerrado o experimento realizado, à temperatura ambiente, o filtro foi trocado e o controlador de temperatura foi ligado para o aquecimento do aerossol.

Esperou-se até atingir os 300°C e iniciava-se o experimento novamente, realizado da mesma forma que o ensaio realizado à temperatura ambiente. Entretanto, nesse caso, o ar que saía do filtro passava por uma camisa de resfriamento antes de atingir o Royco, pois esse equipamento suporta temperaturas de até 50°C. Ao terminar o ensaio a 300°C, trocava-se o filtro novamente e ajustava o controlador de temperatura para que se atingisse 700°C e realizava-se o experimento da mesma maneira do realizado à 300°C.

3.3.1. Contador de Partículas

A contagem do número de partículas na entrada e na saída do filtro foram quantificadas através do contador óptico de partículas Hiac/Royco modelo 5230 (Figura 3.11). Foram analisadas partículas em oito faixas de diâmetro óptico: 0,75µm, 1,5µm, 2,5µm,

3,5 μm , 4,5 μm , 6 μm , 8,5 μm e 12,5 μm . Este equipamento fornece distribuições por tamanhos de partículas com diâmetros aerodinâmicos de 0,3 a 25,0 μm , com erro de 5%.

Este equipamento constituído de: sensor/contador, teclado, display, sistema de entrada e saída do aerossol e um medidor de vazão. Uma bomba de aerossol foi responsável pelo transporte da amostra do aerossol (vazão de 28,3 l/min, monitorada por um medidor de vazão) da entrada até o ponto de saída, passando pelo sensor. A contagem foi feita através do sensor (laser) que detectava a presença de partículas no aerossol e convertia-as em pulsos elétricos cuja amplitude foi proporcional ao tamanho da partícula. Após o término da contagem (1min), os valores poderiam ser visualizados no display e impressos.



Figura 3.11. Contador óptico de partículas Hiac/Royco modelo 5230.

3.3.2. Ensaio de Eficiência de Coleta

Para os ensaios de eficiência de coleta foi utilizado o equipamento da Figura 3.10. Os ensaios foram realizados em duas etapas, a fim de obter número total de partículas que saía do filtro (Partículas na Saída do Filtro) e número total de partículas que entrava no filtro (Partículas na Entrada do Filtro);

3.3.3 Número de Partículas na Entrada do Filtro

Nesse caso, o forno foi fechado sem a colocação do filtro no porta-amostra. Foram anotadas a temperatura e pressão ambiente para a correção dos parâmetros aerodinâmicos (vazão, densidade e viscosidade do gás).

A linha de ar comprimido foi aberta, o gerador de aerossol foi ligado para a estabilização da concentração de particulados e fixava-se a vazão desejada no rotâmetro. Após 10 minutos, iniciava-se o experimento, inserindo o aerossol no sistema de filtração. Foram realizadas 5 contagens do número de partículas para cada faixa granulométrica para permitir a estabilização dos valores. O valor assumido como o número de partícula que entrava no filtro por faixa foi uma média dos valores obtidos estabilizados.

3.3.4. Ensaio Experimentais de Eficiência de Coleta

Para a realização desse trabalho foram realizados ensaios experimentais utilizando os filtros a três níveis de temperaturas: amb, ~300 e ~700°C e na velocidade superficial de filtração 5 cm/s. Para cada amostra foram feitas réplicas dos ensaios experimentais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo estão apresentados os resultados e discussões dos dados obtidos experimentalmente para o filtro de microfibras de quartzo e os filtros cerâmicos. O desempenho dos meios filtrantes foi avaliado a partir de dois parâmetros principais: 1- a resistência ao escoamento promovida pelo meio filtrante, refletida na permeabilidade do meio; 2- a capacidade de remoção de partículas do meio gasoso em função da temperatura, monitorada através da medida de eficiência de coleta.

4.1 Permeabilidades dos Filtros Cerâmicos

Nesta seção está relatado o desempenho dos filtros quanto à permeabilidade em altas temperaturas dos filtros cerâmicos.

4.1.1 Filtro de Microfibras de Quartzo

Os ensaios de permeabilidade ao escoamento do fluido foram realizados utilizando o sistema experimental mostrado nas Figuras 3.7 e 3.8. Para cada ensaio foi plotado o gráfico de queda de pressão em função da velocidade superficial para o material filtrante, conforme descrito no item 3.2. A velocidade superficial do ar foi corrigida para a temperatura de cada ensaio conforme a Equação 2.62. Do mesmo modo, a viscosidade (μ) e a densidade (ρ) do ar também foram corrigidas para a temperatura de cada ensaio conforme a Equação 3.1 e 3.2. O comportamento dos dados experimentais da queda de pressão em função da velocidade superficial do ar para o meio filtrante para cada faixa de temperatura é mostrado na Figura 4.1. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice A.

Pela Figura 4.1 observa-se que ocorreu um aumento linear na queda de pressão quando do aumento da velocidade. As tendências razoavelmente lineares indicam a predominância das forças viscosas. A temperatura e a pressão local modificaram as propriedades do ar (viscosidade e densidade), alterando a contribuição inercial e viscosa na perda de carga total. Foi verificado também que o efeito da elevação da temperatura pela Figura 4.1 mostra claramente que para uma mesma velocidade do gás, aumentou a queda de pressão no filtro na medida em que ocorreu a elevação de temperatura. Resta saber se apenas esses efeitos térmicos são responsáveis pela dependência entre temperatura e perda de carga

mostrada na Figura 4.1.

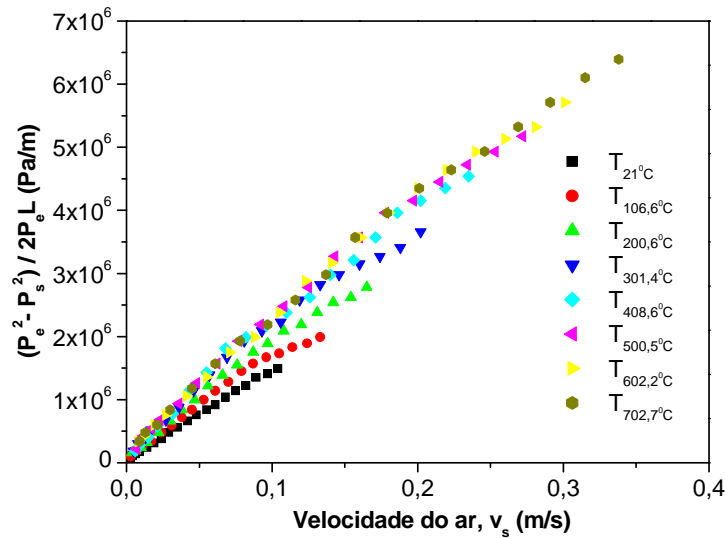


Figura 4.1. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro de microfibras de quartzo.

Com os dados da queda de pressão em função da velocidade superficial a várias temperaturas foi possível determinar a constante de permeabilidade k_1 mostrada na Figura 4.2. A constante Darciana, k_1 que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido pelo filtro, foi obtida através do ajuste da Equação 2.1 que considera apenas o termo linear (Equação de Darcy). Não foi utilizada a Equação de Forchheimer para o filtro de microfibras de quartzo devido os dados não apresentarem tendência parabólica. Isto indica que os efeitos cinéticos são desprezíveis na faixa estudada.

Para velocidades do fluido menores de 10 cm/s na filtração de aerossóis, a resistência ao escoamento inercial tem sido omitida nestes casos. Por essas razões, a maior parte dos valores dados da constante da permeabilidade Darciana, k_1 , encontradas na literatura, variam de 10^{-15} a 10^{-10} m^2 (INNOCENTINI *et al.*, 2005).

Analisando-se a Figura 4.2, observa-se que a constante de permeabilidade Darciana (k_1), aumenta com o aumento da temperatura, observando-se um perfil linear entre k_1 e T, ajustado pela equação 4.1:

$$k_1 = 1,21 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,1826, r^2 = 0,9913. \tag{4.1}$$

onde: T é a temperatura dada em Celsius e k_1 em m^2 .

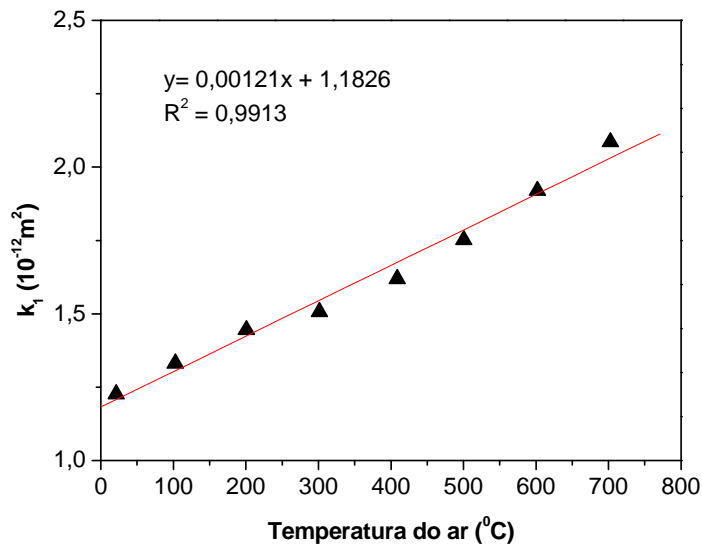


Figura 4.2. Permeabilidade Darciana em função da temperatura para filtro de microfibras de quartzo.

Visto que k_1 foi definida de modo a ser independente das propriedades do fluido (que, de resto foram devidamente corrigidas nos cálculos), o aumento da temperatura deve também ter alterado a estrutura do meio poroso. Deve, por exemplo, ter ocasionado uma dilatação térmica do meio filtrante, aumentando a constante de permeabilidade k_1 . Tal dilatação induz mudanças em propriedades estruturais tais como: porosidade (ϵ), diâmetro de fibra (d_f), comprimento do leito (L), etc. Portanto é de se esperar que qualquer alteração nestes fatores causada pela temperatura tenha um efeito sensível em k_1 . A quantificação desse fenômeno, no entanto, não é trivial e não foi efetuada neste trabalho. Um comportamento semelhante (aumento da constante de permeabilidade darciana, k_1) já foi registrado na literatura e a explicação está relacionada à expansão térmica da estrutura de filtro que causa a abertura temporária dos canais porosos pelo fluido. No trabalho desses autores (PEUKERT, 1998, INNOCENTINI *et al.*, 2001, FREITAS *et al.*, 2004) as constantes de permeabilidade também reagiram diferentemente às mudanças de temperatura, com um aumento na permeabilidade.

O que se verifica é que existe uma interdependência entre o fluxo do gás, a temperatura e a estrutura do filtro, visto que o filtro exibe um comportamento distinto com velocidade e temperatura do gás. Neste caso como a constante de permeabilidade k_1 aumenta com a elevação da temperatura, e como mencionado anteriormente que a perda de carga também aumenta com a temperatura, razões para esse comportamento podem ser explicadas pelas alterações ocasionadas na viscosidade do fluido, visto que este influenciou diretamente na perda de carga. A Figura 4.3 mostra a variação de k_1 com relação ao seu valor à

temperatura ambiente $k_{1,0}$ na escala à esquerda. Mostra também, na escala da direita, a variação da viscosidade do gás μ com relação à viscosidade à temperatura ambiente μ_0 . Verifica-se que a variação da viscosidade com a temperatura é maior que variação de k_1 com a temperatura. O que implica dizer que o efeito da elevação da temperatura de 20 para 700°C aumentou em 37% a perda de carga para o filtro de microfibras de quartzo.

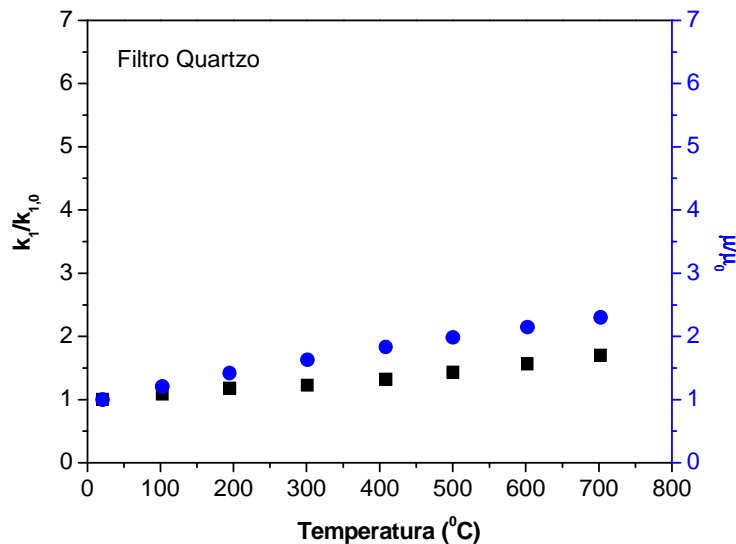


Figura 4.3. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para o filtro de microfibras de quartzo.

Desta forma a investigação da permeabilidade do filtro de fibra de quartzo, e sua dependência da temperatura foram fundamentais para a previsão da perda de carga nos filtros, e sua resposta às grandes variações de temperatura testadas. Os ensaios de filtração da etapa seguinte concluíram o trabalho de investigação do desempenho dos meios filtrantes em relação às alterações com a temperatura.

4.1.2 Filtros Cerâmicos Fibrosos

Os filtros cerâmicos fibrosos foram divididos em duas seções: Filtros B750, A1000 e B1000 e Filtros 1A, 2D, 3D e 5A. Esta divisão levou em conta as diferentes composições e temperaturas de sinterização das amostras em estudo descritas no item 3.1.2.2.

4.1.2.1 Filtros B750, A1000 e B1000

Os ensaios de permeabilidade nos filtros cerâmicos fibrosos foram realizados variando-se a velocidade superficial para cada temperatura numa faixa de 14 a 700 °C. Para

cada valor de velocidade verificava-se o valor da queda de pressão correspondente, utilizando o sistema experimental mostrado na Figura 3.7. A partir dos dados foram construídos gráficos da queda de pressão em função da velocidade superficial na forma da Equação 2.2, para os filtros B750, A1000 e B100. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram a o comportamento da queda de pressão em função da velocidade para os filtros B750, A1000 e B1000, respectivamente. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice B.

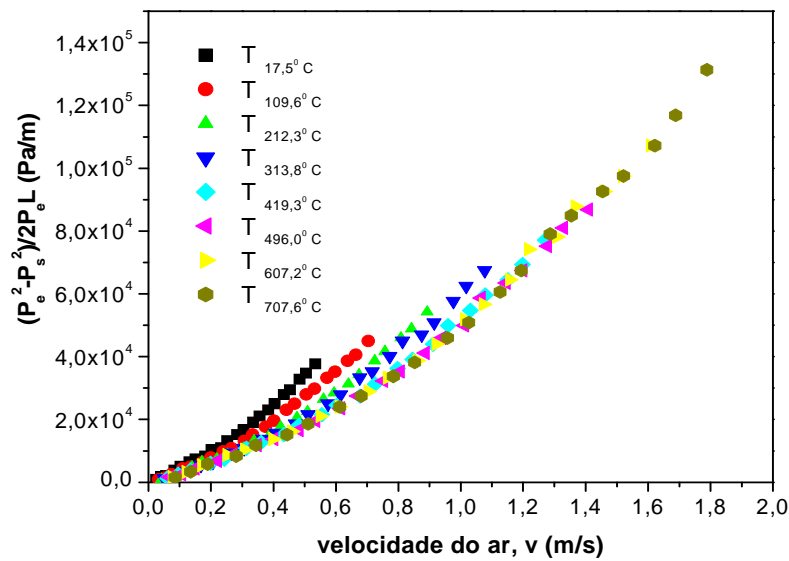


Figura 4.4. Curvas da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para o filtro fibroso B750.

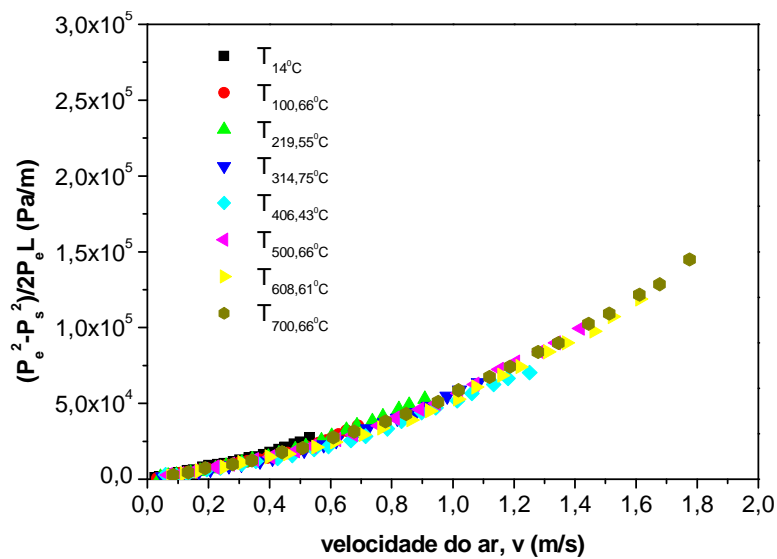


Figura 4.5. Curvas da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para o filtro fibroso A1000.

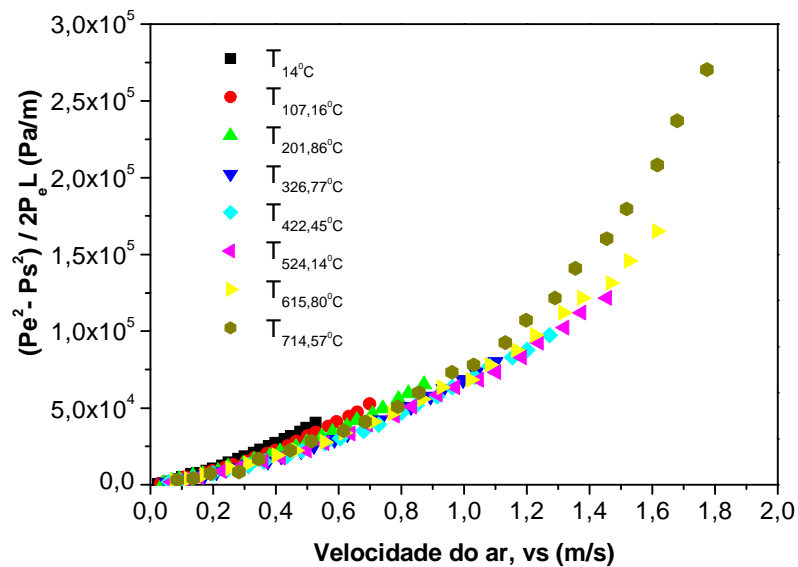


Figura 4.6. Curvas da queda de pressão em função da velocidade em várias temperaturas para o filtro fibroso B1000.

Neste caso o que pode ser observado é que ocorreu um aumento não linear na queda de pressão com o aumento da velocidade. Os dados apresentaram uma tendência parabólica e desta forma foi possível obter o primeiro e o segundo termo da Equação de Forchheimer. Nestas Figuras também pode ser verificada a influência da temperatura sobre a queda de pressão. Para esses filtros os ensaios aerodinâmicos demonstraram que para uma mesma faixa de velocidade, houve a diminuição da queda de pressão com a elevação da temperatura. Sendo apenas que para a temperatura de 700 °C não houve a mesma tendência. Além disso, foi observado que o aumento da temperatura causou em um aumento da extensão da curva, uma vez que para a mesma vazão mássica, maior é a vazão volumétrica com o aumento da temperatura.

Da mesma forma do que foi verificada no filtro de microfibras de quartzo a temperatura e a perda de carga também influenciaram as propriedades do ar (viscosidade e densidade), alterando a contribuição do termo inercial e viscoso da equação de Forchheimer. O aumento da temperatura provoca o aumento na viscosidade e diminuição na densidade do gás. No caso da velocidade baixa, o termo viscoso da Equação 2.2 predomina, e a queda de pressão tende a aumentar com a temperatura. A influência do termo inercial, por outro lado, é maior para altas velocidades do gás e baixas temperaturas. O efeito global depende da faixa de operação e do valor das constantes de permeabilidade (INNOCENTINI, 1997, FREITAS *et al.*, 2004).

Como apresentada na seção 2.4, dentre as diversas equações encontradas na literatura, relacionando propriedades estruturais do material poroso e constante de permeabilidade em situações específicas de escoamento, a equação de Forchheimer, além de simples, é a que descreve de um modo mais geral os principais fatores que influenciam a permeabilidade de um fluido escoando por um meio poroso (INNOCENTINI *et al.*, 1999). O primeiro termo da Equação 2.2 representa a contribuição das forças viscosas sobre a queda de pressão causada pelo atrito entre as moléculas do fluido, e pelo atrito entre o fluido e o meio poroso. E o segundo termo, representa as forças inerciais causados pela turbulência do fluido escoante e/ou pela tortuosidade do meio poroso (INNOCENTINI, 1997).

Com os dados da queda de pressão em função da velocidade superficial a várias temperaturas foi possível determinar a constante de permeabilidade k_1 e k_2 da equação 2.2. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram o comportamento das constantes de permeabilidade Darciana e não-Darciana, k_1 e k_2 , em função da temperatura do ar, para os filtros estudados.

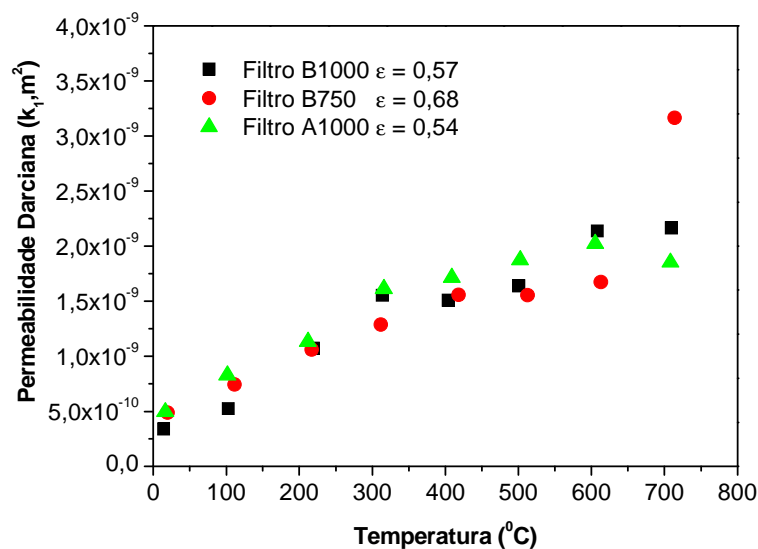


Figura 4.7. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos com diferentes porosidades.

Constatou-se que as constantes de permeabilidade darciana (k_1), aumentam com o aumento da temperatura, observando-se uma dependência de crescimento da constante Darciana, k_1 , com a temperatura enquanto que a constante não-darciana (k_2) diminui com o aumento da temperatura, observando-se uma dependência de decréscimo da constante não-Darciana, k_2 , com a temperatura. O comportamento observado pode ser explicado devido à modificação da estrutura cerâmica. O que também aqui se pode concluir é que a temperatura

além de causar modificações nas propriedades do fluido (corrigidas no equacionamento) também pode causar alterações na estrutura porosa, resultando em alterações nas constantes de permeabilidade k_1 e k_2 .

Tais mudanças verificadas também com o filtro de microfibras de quartzo ocorrerem na porosidade (ϵ), no diâmetro de fibra (d_f), comprimento e espessura do leito (L), etc. Comercialmente filtros cerâmicos fibrosos com porosidades entre 70% e 90% apresentam permeabilidade Darciana k_1 tipicamente na escala de 10^{-10} a 10^{-8} m² e resistência à compressão que varia de 0,5 a 2,0 MPa (SALVINI *et al.*, 2001).

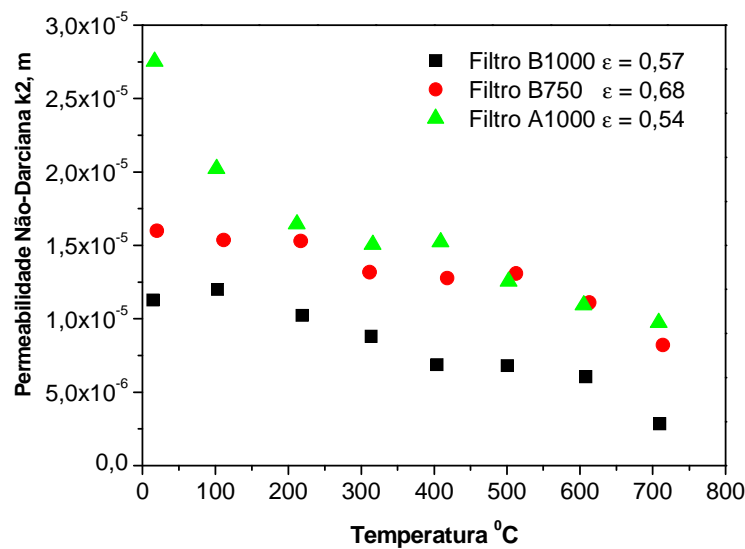


Figura 4.8. Comparação da permeabilidade não- Darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos com diferentes porosidades.

Como mencionado anteriormente diferente do que foi observada com o filtro de microfibras de quartzo, nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 a tendência da queda de pressão é o de diminuir com o aumento da temperatura para a mesma velocidade do fluido.

O comportamento também neste caso pode ser explicado devido a alterações ocorridas nas propriedades do ar e da estrutura cerâmica com o aumento da temperatura. Pela Figura 4.9 foi verificado que o valor das constantes darciana, k_1 com a elevação da temperatura foi superior do que o efeito causado pela temperatura na viscosidade do fluido, razão pela qual ocasionou em uma diminuição da perda de carga nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Sendo que foi mais perceptível para o filtro B1000 em comparação aos outros filtros.

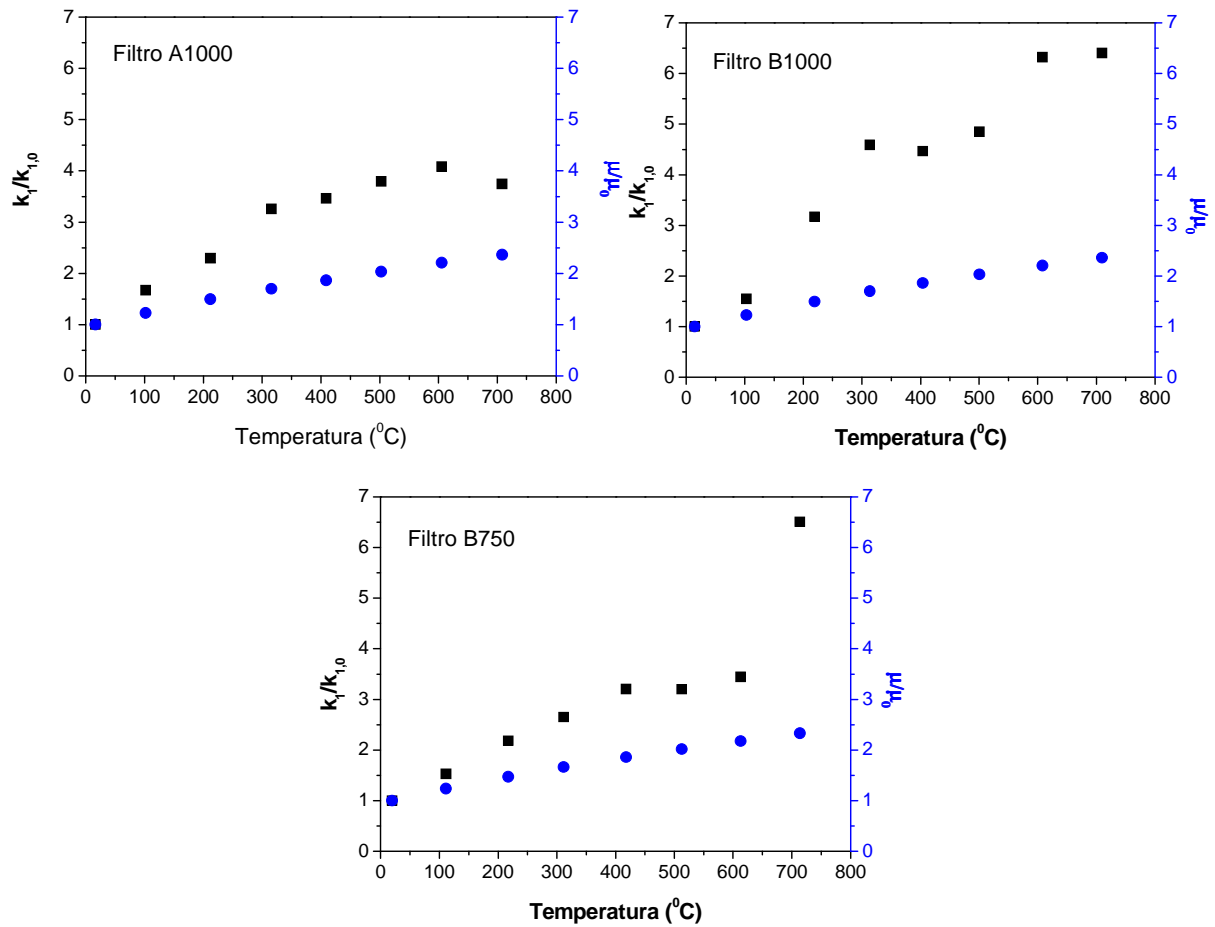


Figura 4.9. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para os filtros A1000, B1000 e B750.

4.1.2.2 Filtros 1A, 2D, 3D e 5A

Para os ensaios foram testados quatro filtros descritos no item 3.1.2.2. Os ensaios de permeabilidade foram realizados em ampla faixa de velocidade (0,01 a 1,8 m/s) e de temperatura (ambiente a 700 °C). Para cada valor de velocidade verificava-se o valor da queda de pressão correspondente, utilizando o sistema experimental mostrado na Figura 3.7.

Para cada ensaio foi plotado o gráfico de queda de pressão em função da velocidade superficial para o material filtrante. Os resultados são mostrados nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, para os filtros 1A, 2D, 3D e 5A, respectivamente. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice C.

A permeabilidade também foi determinada pela Equação 2.2, conhecida como equação de Forchheimer para fluidos compressíveis, onde a queda de pressão através do meio poroso descreve uma dependência não-linear com a velocidade do fluido.

Nas Figuras 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 pode ser observado um resultado semelhante

ao observado nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Visto que também foi obtido um perfil parabólico. Os resultados também demonstraram que para uma mesma velocidade superficial do fluido ocorreu uma diminuição da queda de pressão no filtro na medida em que ocorreu a elevação da temperatura. Nestas Figuras também pode ser sentida a influência da temperatura sobre a queda de pressão. Da mesma forma que nas discussões dos filtros de microfibras de quartzo e os filtros cerâmicos fibrosos B750, A1000 e B1000 esse comportamento observado também tem relação com as alterações ocorridas nas propriedades do ar (provocando alterações nas contribuições dos termos viscosos e inerciais) e da estrutura do meio filtrante, ocasionadas com o aumento da temperatura. O que pode ser verificado é que neste caso a extensão da curva com a elevação da temperatura foi menor do que nos filtros cerâmicos fibrosos B750, A1000 e B1000.

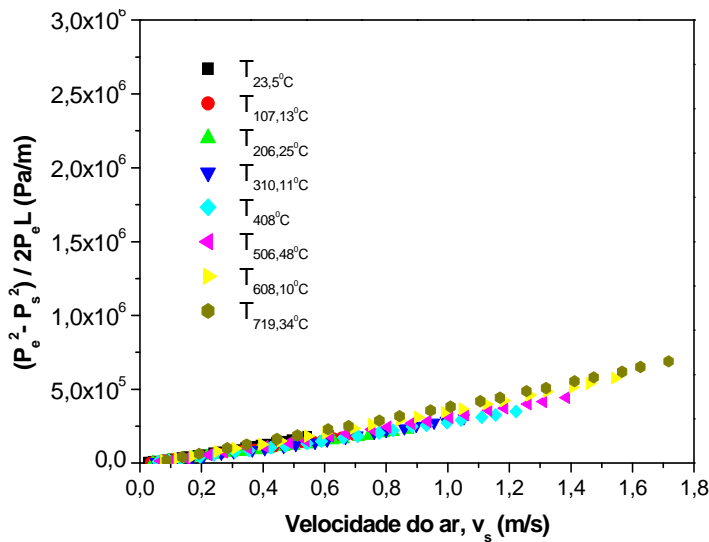


Figura 4.10. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 1A.

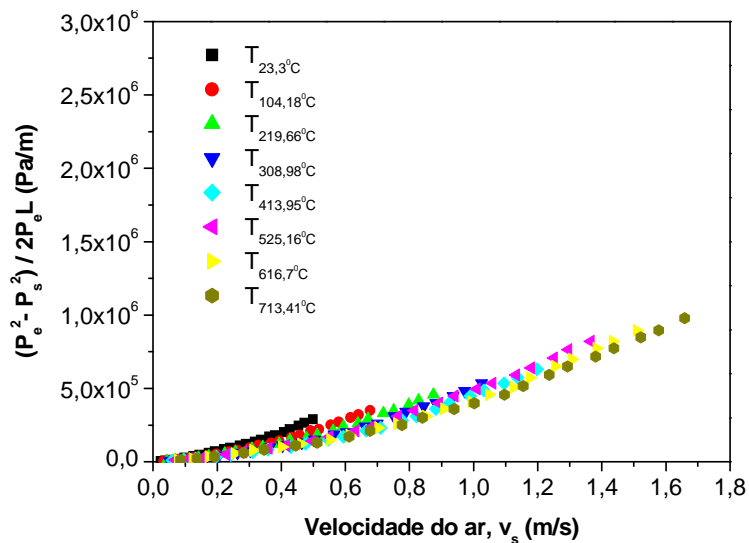


Figura 4.11. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 2D.

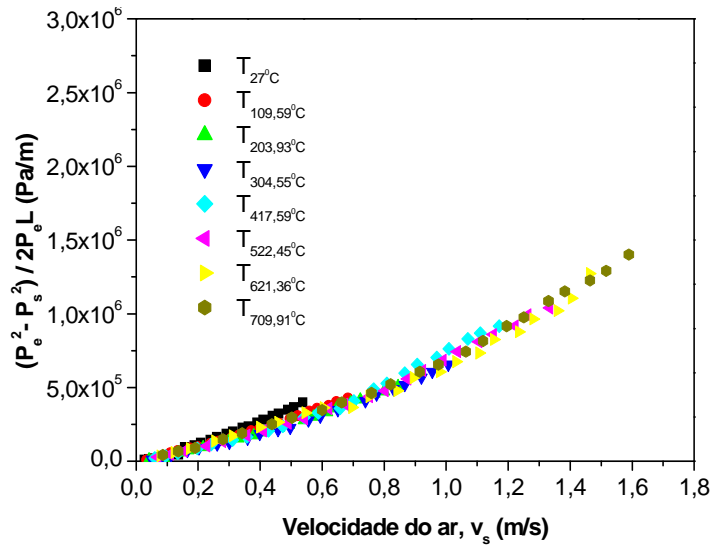


Figura 4.12. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 3D.

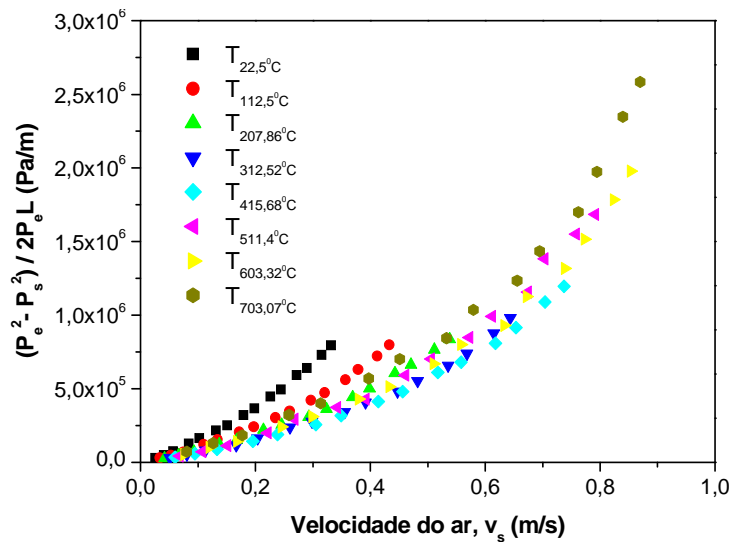


Figura 4.13. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro fibroso cerâmico 5A.

Com os dados da queda de pressão em função da velocidade superficial a várias temperaturas foi possível determinar as constantes de permeabilidade k_1 e k_2 . As Figuras 4.14 e 4.15 mostram o comportamento das constantes de permeabilidade darciana e não-darciana, k_1 e k_2 , em função da temperatura do ar, para os filtros estudados. Aqui também foi observado uma dependência de crescimento de k_1 para com a temperatura. Os resultados mostraram que as constantes de permeabilidade do filtro foram afetadas diretamente pelo aumento da temperatura. Como já fora dito, a temperatura causa alterações nas constantes de permeabilidade, através da contração ou da dilatação dos poros da estrutura com o aumento da temperatura.

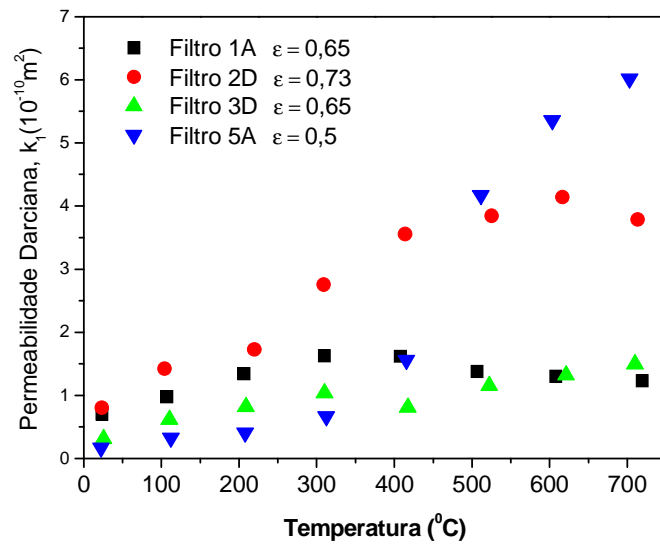


Figura 4.14. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.

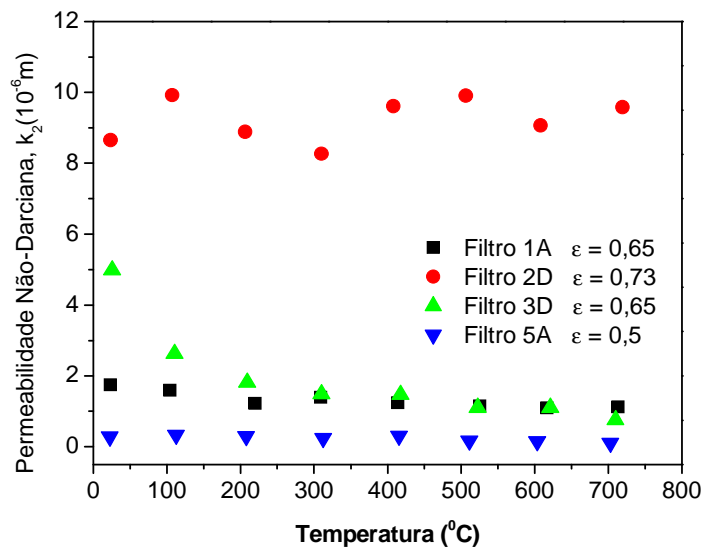


Figura 4.15. Comparação da permeabilidade não-Darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.

Os ensaios de permeabilidade em temperaturas elevadas mostram a complexidade das interações entre as propriedades do gás e da estrutura fibrosa. A temperatura como dita anteriormente, age de forma a causar modificações nas propriedades do fluido com o aumento da viscosidade e diminuição da densidade, bem como na estrutura porosa. Como já verificado essas mudanças estruturais, não corrigidas no equacionamento aqui utilizado, são as prováveis responsáveis pelas alterações nas constantes de permeabilidade k_1 e k_2 . Tais mudanças afetam diretamente a porosidade (ϵ), o diâmetro de fibra (d_f), comprimento espessura do leito (L), etc. Esses efeitos causados pela elevação da

temperatura dependem da contração ou da dilatação dos poros da estrutura fibrosa, observado até o momento em todos os filtros estudados, sendo que o efeito da temperatura sobre a estrutura porosa foi mais sentido para os filtros cerâmicos fibrosos.

Foi observado que as constantes de permeabilidade tendem a aumentar, com o aumento da porosidade (Figura 4.16). No entanto, é bom notar que a permeabilidade depende não somente do total de porosidade, mas também do tamanho de poros e número de poros na área de escoamento (INNOCENTINI *et al.*, 1998).

Como mencionado nas seções anteriores, nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 a tendência da queda de pressão também foi a de diminuir com o aumento da temperatura para a mesma velocidade do fluido. Pela Figura 4.17 foi verificado que o valor das constantes darciana, k_1 com a elevação da temperatura também foi superior do que o efeito causado pela temperatura na viscosidade do fluido, razão pela qual ocasionou em uma diminuição da queda de pressão. Sendo que foi mais perceptível para o filtro 5A e menor para o filtro 1A.

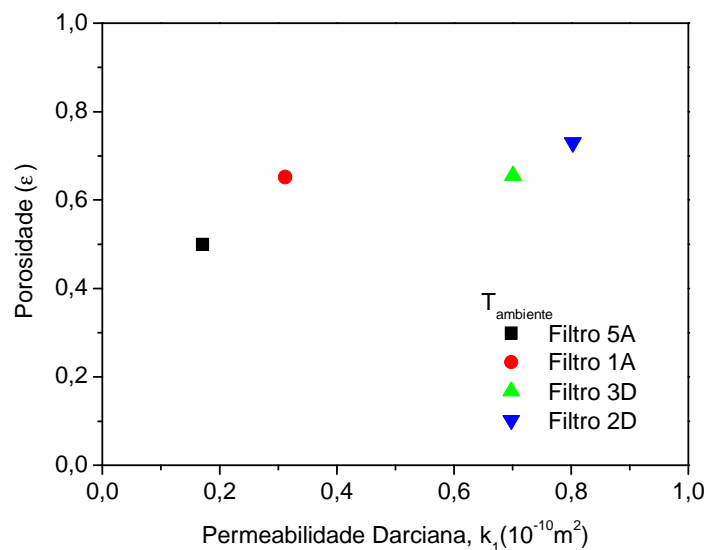


Figura 4.16 Relação da permeabilidade Darciana (k_1) com a porosidade dos filtros: 1A, 2D, 3D e 5A.

Em comparação aos testes de permeabilidade dos filtros A1000, B1000 e B750 apresentados no item anterior, verifica-se que os filtros em questão foram menos permeáveis, entretanto foi verificado que os filtros em questão ficaram mais resistentes em relação aos filtros 1A, 2D, 3D e 5A.

No geral é importante notar que todos os valores obtidos da constante de permeabilidade Darciana, k_1 , para os filtros cerâmicos fibrosos (Filtros de quartzo, Filtros cerâmicos B750, B1000, A1000, 1A, 2D, 3D e 5A) até este momento estão na ordem de

grandeza esperada para filtros de gases quentes (FREITAS *et al.*, 2006; SEVILLE, 1997).

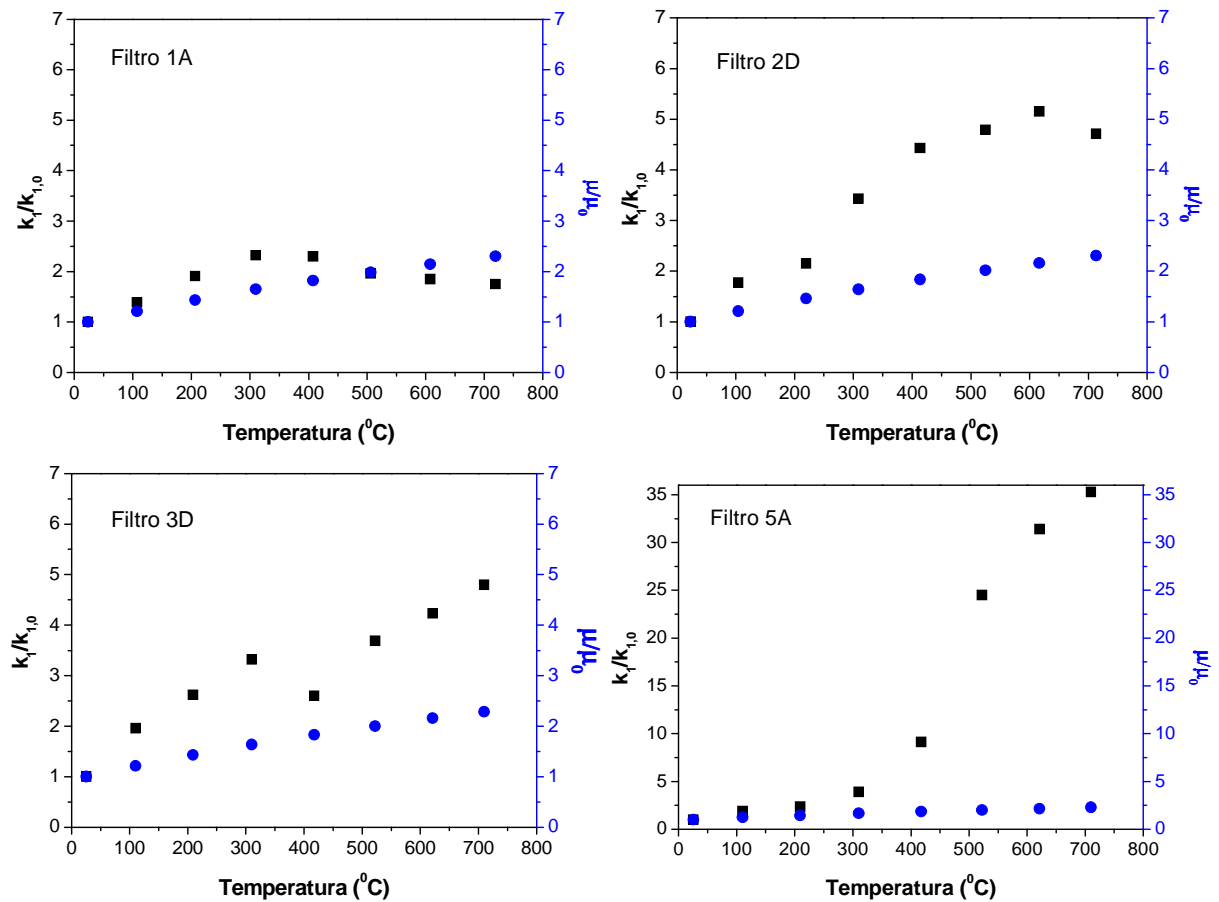


Figura 4.17. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para os filtros: 1A; 2D; 3D e 5A.

4.1.3 Filtros Cerâmicos Celulares A12 e A13.

Os ensaios de permeabilidade ao escoamento do fluido foram realizados utilizando o sistema experimental mostrado nas Figuras 3.7 e 3.8. Os filtros cerâmicos celulares (Amostras 12 e 13) foram analisados quanto à permeabilidade em uma ampla faixa de temperatura de 15,5 a 701,6°C e velocidade superficial de 0 a 0,2 m/s. Para cada ensaio foi plotado o gráfico de queda de pressão em função da velocidade superficial para o material filtrante. As Figuras 4.18 e 4.19 mostram a influência da temperatura sobre a curva de pressão dos filtros cerâmicos. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice D.

Como verificado anteriormente nos filtros cerâmicos fibrosos nas Figuras 4.18 e 4.19 também pode ser observado que para uma mesma velocidade do gás, a queda de pressão no filtro diminuiu à medida que ocorre a elevação de temperatura. Isso pode ser mais fortemente verificado para o Filtro A13. Isto significa dizer que menos energia do sistema está sendo exigido para o ar atravessar a membrana filtrante. A elevação da temperatura também

ocasionou em alterações na membrana filtrante, provocando uma maior facilidade na passagem do ar pelos canais porosos, refletida por meio da perda de carga.

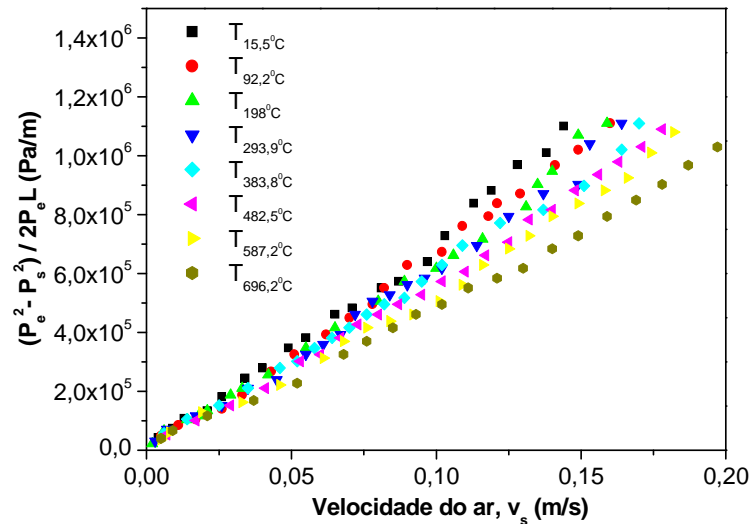


Figura 4.18. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para filtro cerâmico celular Amostra 12.

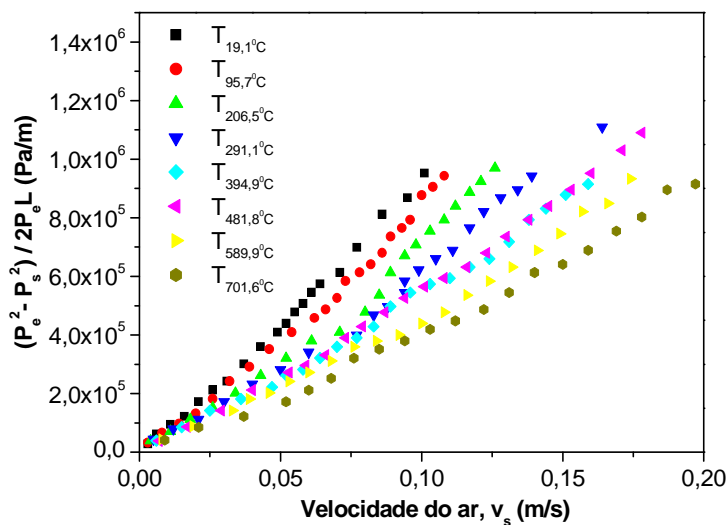
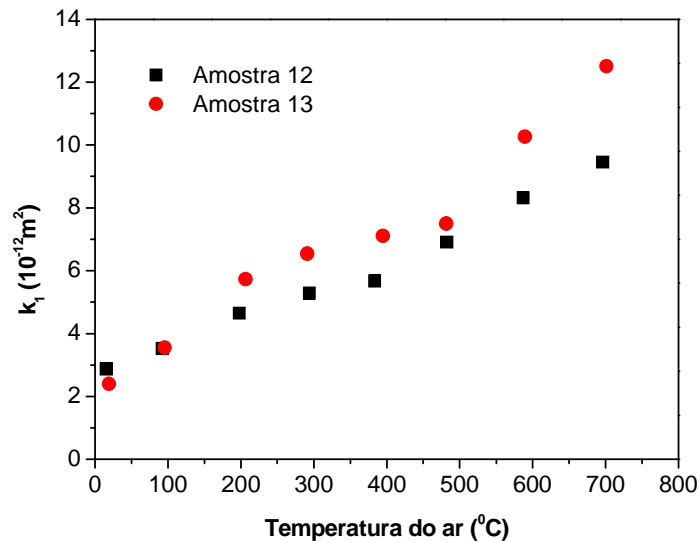


Figura 4.19. Curvas de queda de pressão em função da velocidade a várias temperaturas para o filtro cerâmico celular Amostra 13.

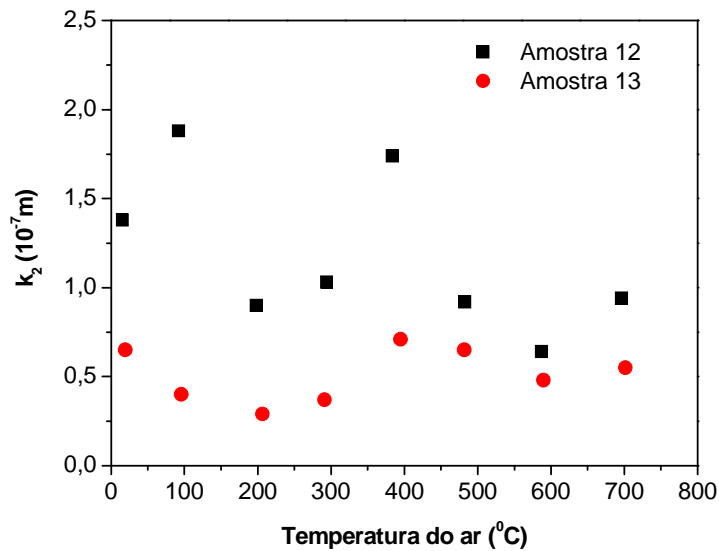
O comportamento observado pode ser explicado com base em dois aspectos já mencionado nos filtros testados anteriormente: alteração das propriedades do gás e modificação na estrutura cerâmica.

A Figura 4.20 mostra a influência da temperatura para as constantes k_1 e k_2

para os filtros cerâmicos celulares A12 e A13 nas diferentes temperaturas. Através destes gráficos ficou claro que a membrana filtrante sofreu alterações com o aumento da temperatura, visto que houve uma tendência do aumento linear da constante Darciana, k_1 com a temperatura e uma tendência instável foi observada para a constante não-Darciana, k_2 com o aumento da temperatura para ambas as amostras (A12 e A13).



(a)



(b)

Figura 4.20. Comparação da Permeabilidade: a) darciana (k_1) e b) não-darciana (k_2) em função da temperatura para os filtros cerâmicos celulares A12 e A13 com diferentes porosidades.

Tal comportamento é compatível com tendências na literatura, (INNOCENTINI *et al.*, 2001, FREITAS *et al.*, 2004) e confirma o fato que para velocidades típicas de filtração ($< 10 \text{ cm/s}$), a Lei de Darcy pode ser usada com segurança para prever a

queda de pressão somente quando o termo linear da equação de Forchheimer (Eq. 2.2) for importante, como no caso do filtro de microfibras de quartzo, em que foi considerado apenas o termo linear da equação. Se a velocidade é baixa, o termo viscoso da Equação 2.2 predomina. Entretanto com o aumento da velocidade de escoamento, a equação de Darcy deixa de ser satisfatória, já que os efeitos inerciais tornam-se importantes e precisam ser considerados. Nestes casos observa-se um comportamento parabólico da perda de carga em relação à velocidade superficial como verificado para os filtros cerâmicos fibrosos, sugerindo-se o uso da Equação de Forchheimer para caracterizar o sistema.

Foi verificado que na faixa de temperatura de 20° a 700°C, k_1 aumentou aproximadamente de 2 a 4 vezes para a amostra 12 e de 2 a 6 vezes para a amostra 13. Visto que a viscosidade aumentou somente 30%, o que implica que o efeito da elevação da temperatura de 20 para 700°C reduziu em 30% a perda de carga para o filtro A12 e 55% para o filtro A13. Com o aumento da temperatura verifica-se que a amostra 13 foi mais permeável que a amostra 12, o que pode ser relacionado à porosidade aberta de 54,8% para amostra 13 em relação a porosidade de 42,1% para a amostra 12. O comportamento característico do aumento da constante de permeabilidade, k_1 , está desta forma relacionada com aos efeitos reversíveis da expansão térmica durante o aquecimento das membranas de uma temperatura ambiente a 700°C, ocasionando em uma dilatação dos canais porosos dos filtros cerâmicos.

Como verificado nas Figuras 4.18 e 4.19 a tendência da queda de pressão também foi de diminuir com o aumento da temperatura para a mesma velocidade do fluido. Pela Figura 4.21 foi verificado que o valor da constante darciana, k_1 com a elevação da temperatura também foi superior do que o efeito causado pela temperatura na viscosidade do fluido, razão pela qual ocasionou em uma diminuição da perda de carga nas Figuras 4.18 e 4.19.

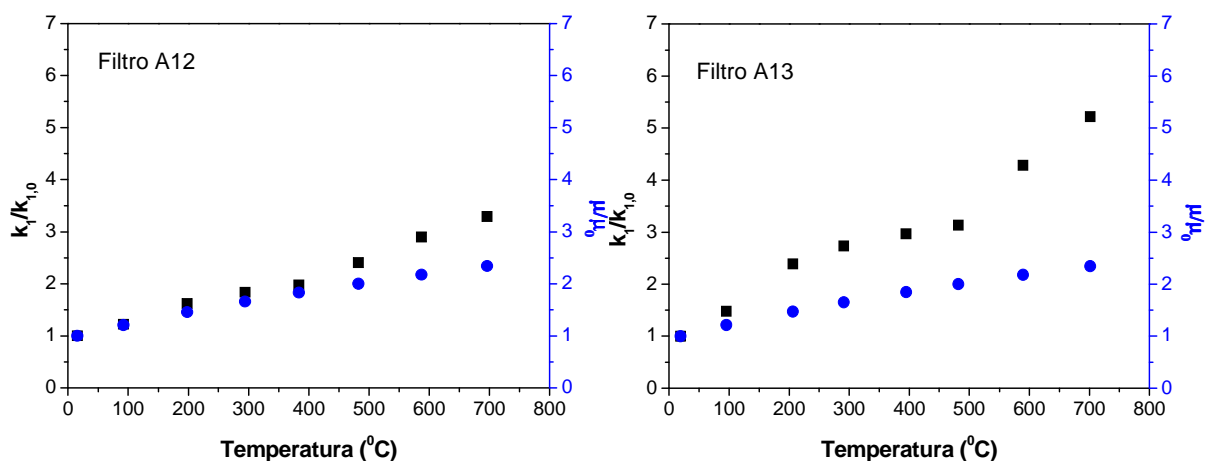


Figura 4.21. Comparação da permeabilidade Darciana (k_1) com a influência da viscosidade em relação à elevação da temperatura para os filtros: A12 e A13.

4.2 Eficiências de coleta dos Filtros Cerâmicos.

A seguir, apresentam-se os resultados do desempenho dos filtros cerâmicos quanto à eficiência de coleta de material particulado em trabalhos a altas temperaturas.

4.2.1 Filtro de Microfibra de Quartzo.

Os testes de filtração dos filtros de microfibra de quartzo foram realizados segundo os procedimentos descritos no item 3.3. Foram analisadas partículas em oito faixas granulométricas: 0,75; 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 6; 8,5 e 12,5 μ m. Detalhes do sistema utilizado para os ensaios de filtração são esquematizados na Figura 3.10.

Na Figura 4.22 estão ilustrados os dados de eficiência de coleta global (Eq.2.42) em função do tempo de filtração para as temperaturas de teste (22,9°C, 298,5°C e 698,5°C) para o filtro de microfibra de quartzo. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice E.

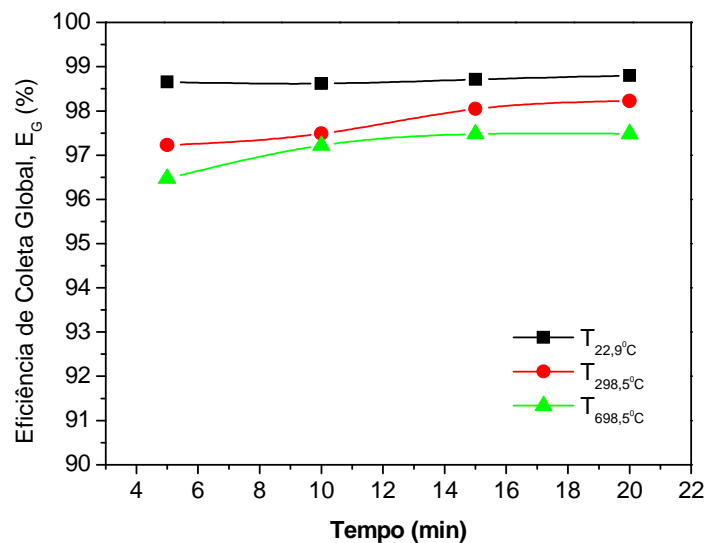


Figura 4.22. Eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro do microfibra de quartzo.

Observando a Figura 4.22, percebe-se que as eficiências de coleta globais foram altas, acima de 96,5% para todas as temperaturas. Observa-se um aumento nas eficiências de coleta ao longo do tempo para as temperaturas de 298,5°C e 698,5°C, na temperatura de 22,9°C observa-se um perfil constante. Verifica-se que a eficiência de coleta global diminui com o aumento da temperatura, a alta temperatura provocou alterações nas

propriedades do gás (densidade e viscosidade). O aumento da temperatura pode também ter ocasionado em uma dilatação dos poros do filtro reduzindo a retenção do material particulado e, como consequência diminuir a eficiência de coleta do filtro.

Entretanto a análise da eficiência global não é totalmente suficiente para mostrar a eficiência do filtro, visto que o desempenho dos filtros no controle de emissão de material particulado baseado somente na sua eficiência global de coleta não permite verificar o efeito do tamanho de partícula. Devido a crescente preocupação com a qualidade do ar e os efeitos nocivos do chamado pó respirável os pesquisadores verificaram ser necessário quantificar o desempenho destes por faixa de tamanho de partículas, a chamada eficiência fracionária.

A eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro de partícula do material particulado para o filtro de microfibras de quartzo nas diferentes condições experimentais é mostrada pelas Figuras 4.23 e 4.24, para 5 min e 20 min respectivamente.

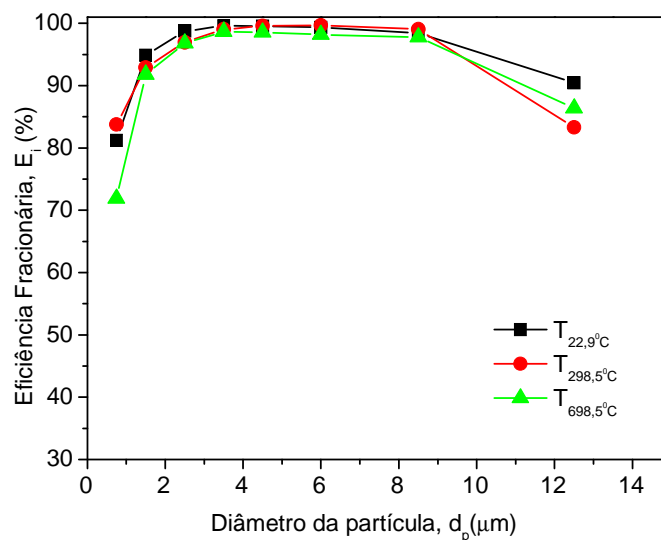


Figura 4.23. Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro de microfibras de quartzo nos primeiros 5 minutos de filtração.

Foi observada uma diminuição da eficiência de coleta fracionária do filtro com o aumento da temperatura do gás nos testes de filtração. Este comportamento, dito anteriormente, pode ser explicado pelas mudanças nas propriedades físicas do gás, visto que o aumento da temperatura influencia a densidade e, principalmente, a viscosidade do gás. Por outro lado, o aumento na temperatura também causa uma mudança estrutural nos canais porosos devido a uma expansão térmica, como discutido acima, e aquele efeito, mesmo em

pequena magnitude, pode ter efeito considerável na capacidade de coleta de partícula pelo filtro. Este efeito no filtro causado pelo aumento da temperatura também foi observado por HENRIQUEZ E MACIAS-MACHIN, 1997, INNOCENTINI, 1997, PEUKERT, 1998, FREITAS *et al.*, 2006.

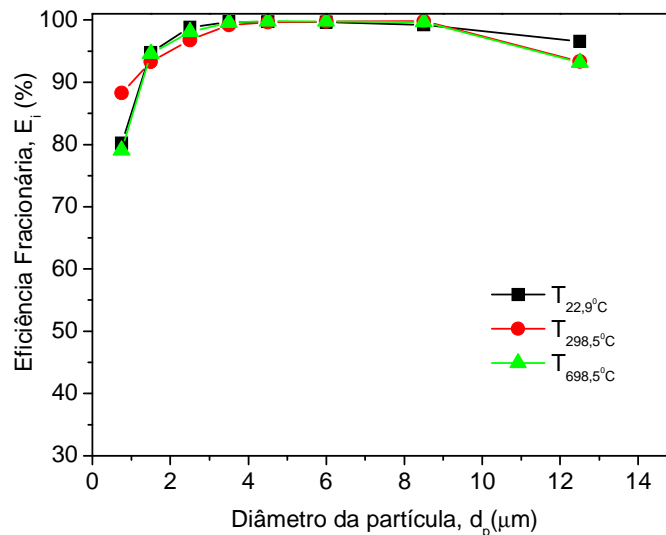


Figura 4.24. Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro de microfibra de quartzo nos 20 minutos de filtração.

Por meio das Figuras 4.23 e 4.24 observa-se que na faixa de tamanho estudada, a coleta de partículas não foi necessariamente melhor para partículas maiores. Na realidade, a eficiência de coleta alcançou um máximo para partículas entre 2 e $6 \mu\text{m}$. Abaixo desta faixa, ocorreu a penetração de partículas pequenas e a eficiência foi relativamente baixa (70 a 85%) em todas as temperaturas testadas.

Foi verificado que o aumento da eficiência de coleta foi até o diâmetro de partícula com tamanho $6 \mu\text{m}$. A eficiência de coleta diminuiu para partículas acima de $8 \mu\text{m}$ provavelmente devido ao fenômeno atribuído ao ricochete da partícula. Acima deste observa-se um decréscimo na eficiência de coleta, uma vez que partículas maiores têm uma dificuldade maior de passar pelas fibras do filtro. CAVENATI (1996) demonstrou que na região de alta inércia da partícula ocorreu um decréscimo da eficiência do filtro. Atribuindo a este fenômeno como o ricochete da partícula. O “ricochete” das partículas nos coletores foi observado para todas as temperaturas estudadas.

Como descrito na seção 2.5 foi mostrado que a coleta das partículas presentes em um fluxo de gás se dá através de vários mecanismos: i) difusional, mais eficiente na filtração de partículas menores que $2 \mu\text{m}$. Os mecanismos inercial, gravitacional e

intercepção direta são mais eficientes na filtração de partículas maiores que $2\mu\text{m}$ (STEFFENS E COURY, 2007). O que se sabe é que o aumento da temperatura provoca um aumento na eficiência de coleta pelos mecanismos difusional e gravitacional, mas causa uma redução na eficiência do mecanismo inercial (FREITAS *et al.*, 2006).

Por outro ponto de vista a operação de filtração a altas temperaturas também é fortemente influenciado pelas propriedades adesivas e coesivas das partículas e o meio filtrante. Essas propriedades são determinadas pelas forças entre as partículas e a forças entre as partículas e o meio. Em geral, essas forças sofrem um aumento com a elevação da temperatura que combina com diferentes mecanismos como descrito na Tabela 2.6 apresentada na secção 2.8. Trabalhos com temperaturas elevadas provocam o amolecimento das partículas (partículas se tornam pegajosas) e o achatamento dos pontos de contato (PILZ, 1996).

O efeito do tempo de filtração pode ser visto comparando-se as Figuras 4.23 e 4.24, quando a eficiência de filtro vem medida depois de 5 e 20 minutos de filtração, respectivamente. Pode ser verificado que a eficiência de coleta aumentou para todas as temperaturas testadas. Isto é característico dos filtros de barreira: depois da retenção, as partículas coletadas contribuem para a captura das próximas partículas.

Pode-se observar que com o decorrer do tempo, a queda de pressão no filtro aumentou levemente (450 a 470 Pa na $T_{22,9^\circ\text{C}}$), isto se deve ao acúmulo de material particulado em sua superfície (Figura 4.25), o que dificulta o escoamento do gás ocasionado em perda de energia pelo sistema.



Figura 4.25. Fotografia do filtro de microfibras de quartzo após ensaio de filtração (duração de 60 min).

Desta forma podemos concluir que, a eficiência de coleta alcançou valores acima de 95% para partículas na faixa de tamanho de 2-10 μ m. A eficiência aumentou com o tempo de filtração e diminuiu com o aumento na temperatura de gás. Nenhuma mudança substancial na eficiência foi observada com o aumento na temperatura, confirmando a integridade da membrana de filtração de microfibras de quartzo. Como um todo, a eficiência de coleta dos filtros testados foi muito satisfatória e bem dentro do comportamento esperado para filtração de aerossol quente (FREITAS *et al.*, 2006).

4.2.2 Filtros Cerâmicos Fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.

Os ensaios de filtração foram efetuados conforme descrito no item 3.3. A Figura 4.26 ilustra os dados de eficiência de coleta global em função do tempo de filtração para as temperaturas de teste. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice F. Foram analisadas partículas em sete faixas granulométricas: 0,6; 0,85; 2; 4; 6; 8,5 e 12,5 μ m. As características dos filtros cerâmicos fibrosos e as condições de operação utilizadas nos ensaios de filtração estão apresentadas na Tabela 3.7.

Observando a Figura 4.26 percebe-se que as eficiências de coleta globais foram altas, acima de 97% para todas as temperaturas, com exceção do filtro 2D, que apresentou uma menor eficiência com o aumento da temperatura. Os filtros apresentaram uma perda de carga inicial nos testes de filtração a uma velocidade de filtração de 0,05 m/s entre 150 a 700Pa.

Pela Figura 4.27, nota-se que a eficiência de coleta é maior para o filtro com uma menor porosidade, tanto na T_{ambiente} quanto na $T_{700}^{\circ}\text{C}$. Isto mostra que a porosidade do meio filtrante teve influência na filtração, pois dificultou a passagem do material particulado pelo filtro, aumentando a eficiência de coleta.

Os filtros utilizados nos testes foram preparados a partir de mantas refratárias silico-aluminosas comerciais (Tecnotermo Isolantes) todos com a mesma composição. As amostras foram prensadas em 2,5 toneladas para o filtro 1A, em 1,5 toneladas, filtro 2D, em 3,5 toneladas para o filtro 3D e em 7,5 toneladas para o filtro 5A. Todos os filtros foram sinterizados a 1350 $^{\circ}\text{C}$. Sabe-se que fibras de menor comprimento formam uma rede de poros com tamanhos menores, influenciando a porosidade do meio após a sinterização.

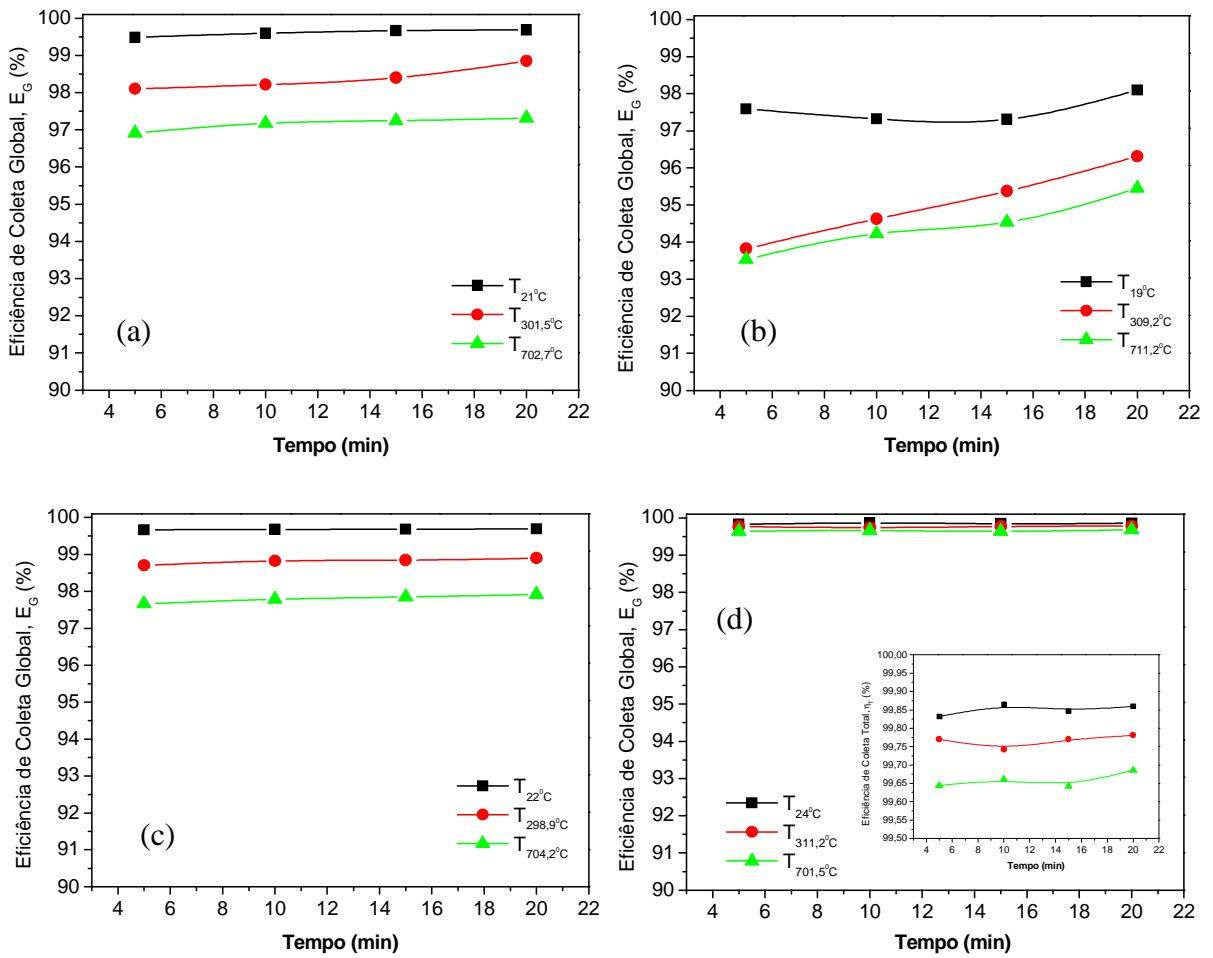


Figura 4.26. Eficiência de coleta global em função do tempo de filtração para os filtros cerâmicos fibrosos para as diferentes temperaturas com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) 1A; b) 2D; c) 3D; d) 5A.

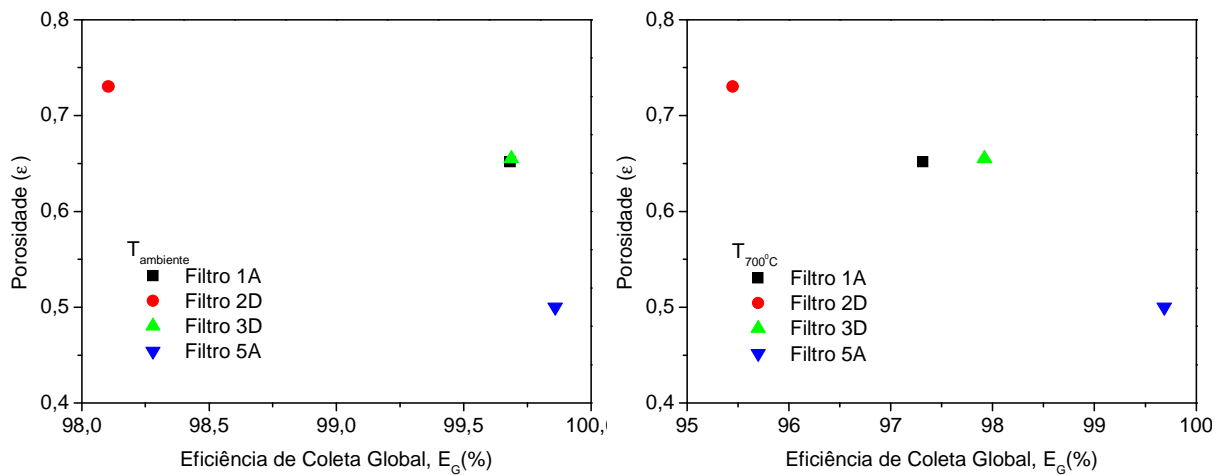


Figura 4.27 Relação da eficiência de coleta global (E_G) na T_{ambiente} e na $T_{700^\circ\text{C}}$ com a porosidade dos filtros: 1A, 2D, 3D e 5A.

Nas Figuras 4.28 e 4.29 são ilustrados os dados de eficiência de coleta em função do diâmetro do material particulado nas três temperaturas para os filtros cerâmicos fibrosos estudados, nos 5 min e 20 min respectivamente. A eficiência de coleta experimental, por faixa granulométrica (E_i) foi determinada pela Equação 2.43.

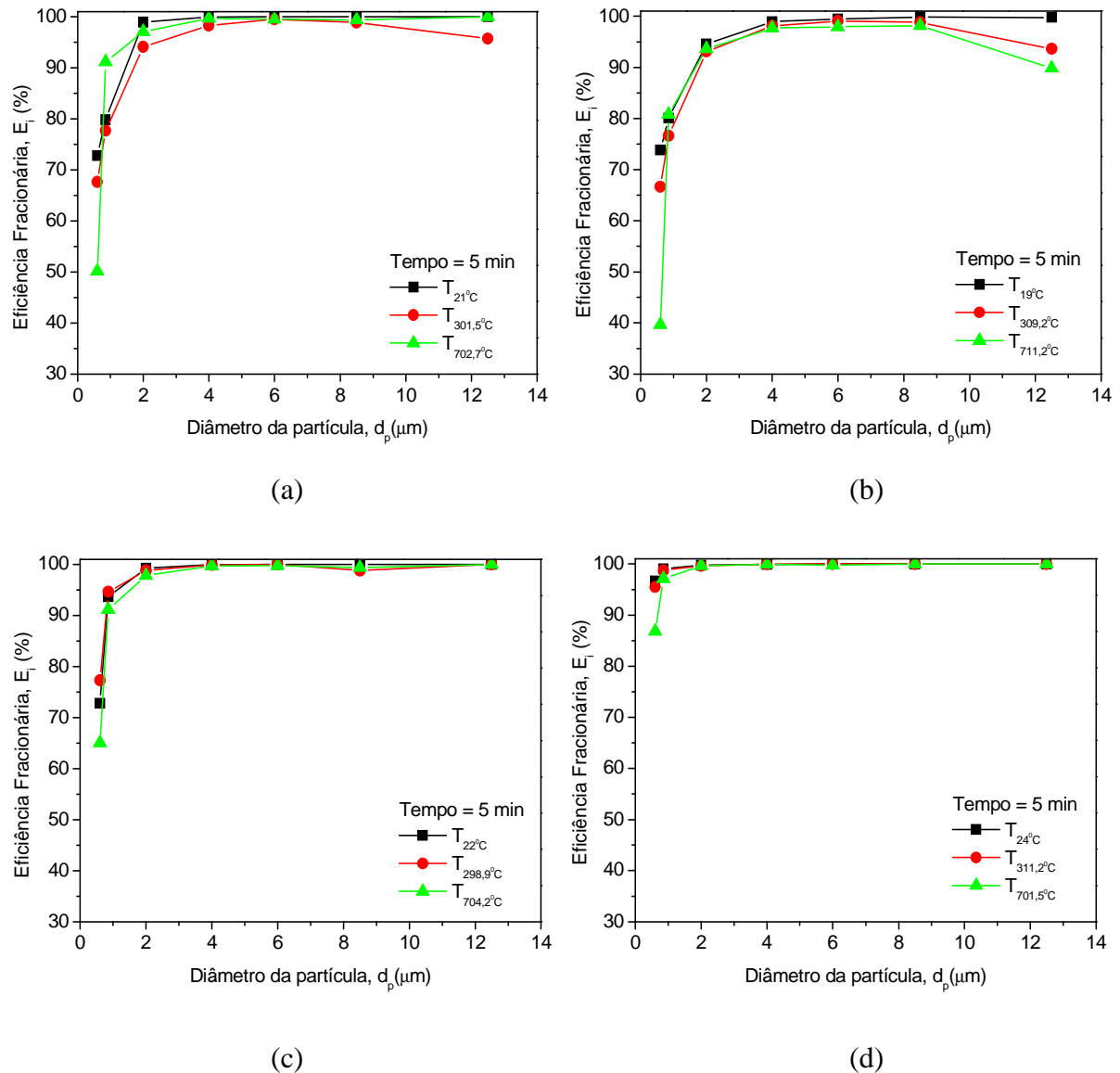


Figura 4.28. Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para os filtros cerâmicos fibrosos nas diferentes temperaturas nos 5 minutos de filtração trabalhando com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) 1A; b) 2D; c) 3D; d) 5A.

Os ensaios de filtração em temperaturas elevadas mostraram as mesmas tendências observadas à temperatura ambiente. A observação mais significativa das Figuras é que a eficiência do filtro diminui com o aumento da temperatura do gás nos ensaios realizados. Razões para tal comportamento são diversas.

Como já forá mencionado pode-se verificar que o aumento de temperatura

provoca alterações nas propriedades do gás (diminuição da densidade e aumento da viscosidade) que alteram a capacidade de remoção do filtro. Além de também ocasionar em uma mudança estrutural no meio poroso devido a uma expansão térmica que embora em pequena magnitude, apresenta efeitos consideráveis na capacidade de remoção do filtro (INNOCENTINI, 1997, FREITAS et al., 2006). Somado a influência causada pelas propriedades adesivas e coesivas das partículas e o meio filtrante.

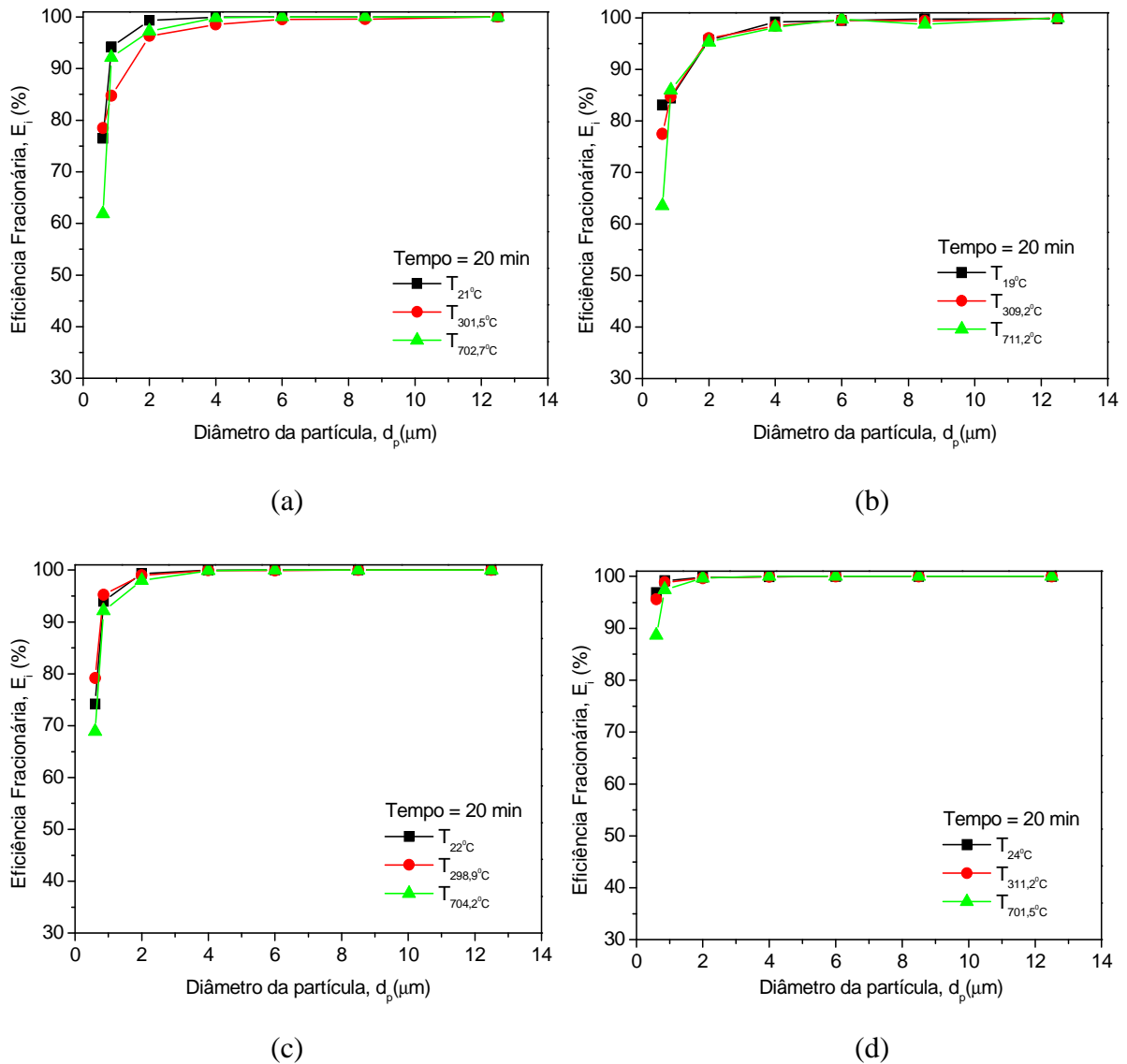


Figura 4.29. Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para os filtros cerâmicos fibrosos nas diferentes temperaturas nos 20 minutos de filtração trabalhando com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: a) 1A; b) 2D; c) 3D; d) 5A.

Por meio das Figuras 4.28 e 4.29 observa-se que a eficiência de coleta aumenta com o crescimento do diâmetro da partícula, conforme o esperado, uma vez que as partículas maiores têm uma dificuldade maior de passar pelos poros do filtro. Partículas maiores

apresentam uma maior inércia. Como já verificado com o filtro de microfibras de quartzo a eficiência de coleta também diminuiu para partículas acima de $8\mu\text{m}$. Esse fenômeno foi atribuído ao “ricochete” das partículas nos coletores observado também com os filtros cerâmicos fibrosos, entretanto em menor intensidade comparada ao filtro de microfibras de quartzo. Pode-se observar, entretanto que todos os filtros testados foram extremamente eficientes para a coleta de partículas acima de $2\mu\text{m}$.

É interessante frisar que, embora uma diminuição na eficiência aconteça com o aumento da temperatura, os níveis de remoção permanecem altos, e não comprometem o desempenho do filtro. Os testes de filtração também mostraram uma dependência clara entre eficiência de filtro e temperatura de teste, sendo obtidas eficiências menores com a elevação da temperatura do gás.

Fica claro através das Figuras 4.28 e 4.29 que a eficiência de coleta aumenta com o decorrer do tempo para todas as faixas de diâmetros de partícula estudadas, como já verificado com o filtro de microfibras de quartzo podemos atribuir isto ao material particulado que fica retido no filtro servindo de barreira para as novas partículas, da mesma maneira que foi observado para a eficiência de coleta global.

Os filtros cerâmicos fibrosos apresentaram os requisitos para condução deste novo tipo de estrutura como alternativa muito promissora para a limpeza de gases a altas temperaturas, visando em uma investigação mais detalhada deste novo tipo de estrutura objetivando sua utilização industrial.

4.2.3 Filtros Cerâmicos Celulares A12 e A13.

Os testes de eficiência de coleta foram realizados na temperatura ambiente e na $T_{700^\circ\text{C}}$. Os ensaios de filtração foram realizados utilizando o esquema experimental mostrado na Figura 3.10. Os ensaios de filtração foram efetuados conforme descrito no item 3.3. Foram analisadas partículas em sete faixas granulométricas: 0,6; 0,85; 2; 4; 6; 8,5 e $12,5\mu\text{m}$. As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram a eficiência de coleta global e as eficiências fracionárias para uma velocidade de filtração de $0,05\text{ m/s}$. Os valores experimentais encontram-se no Apêndice G.

As Figuras 4.30 mostram que a eficiência de coleta global para as amostras A12 e A13 teve uma melhora ao longo do tempo de filtração na $T_{700^\circ\text{C}}$, e que este apresentou uma eficiência de coleta menor comparado a T_{amb} . Na primeira etapa da filtração, denominada também de filtração interna, as fibras do meio filtrante são responsáveis pela captura das

partículas. Com o transcorrer da filtração e conseqüente aumento das partículas coletadas, inicia-se uma fase de transição, com a formação de dendritos (WALSH *et al.*, 1996). Estes dendritos são estruturas formadas pela aglomeração de partículas no interior do meio, que passam a agir como novos elementos coletores (REMBOR e KASPER, 1996). Para os testes na temperatura ambiente, praticamente nenhum efeito do tempo foi observado, percebe-se que altas eficiências de coleta foram obtidas (99,9%) desde o início do ensaio. Os filtros apresentaram uma perda de carga inicial nos testes de filtração a uma velocidade de filtração de 0,05 m/s entre 2000 a 4500Pa.

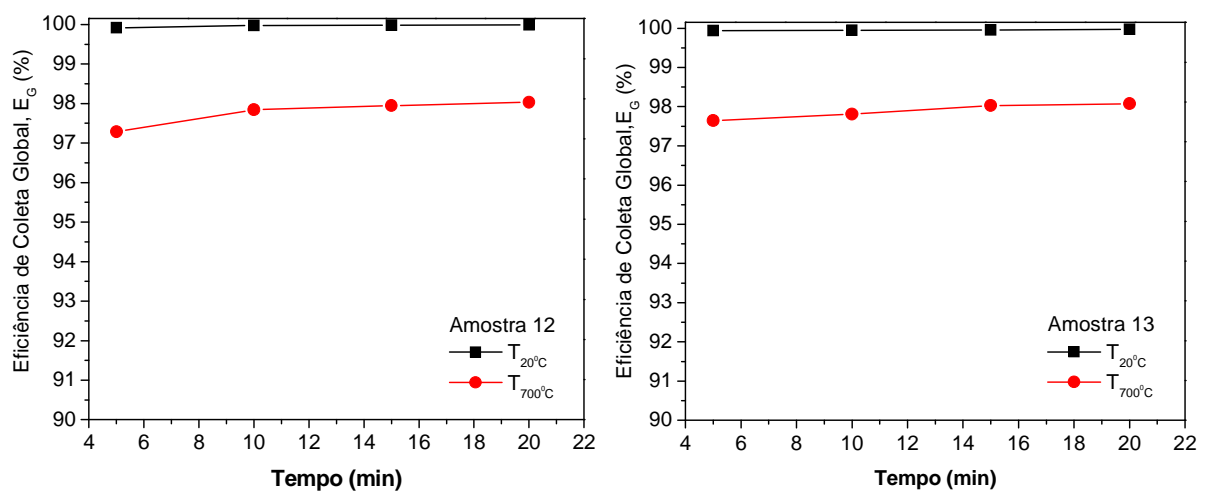


Figura 4.30. Eficiência de coleta global em função do tempo de filtração para os filtros cerâmicos celulares para as diferentes temperaturas com uma velocidade de filtração de 5 cm/s. Filtros: A12 e A13.

As Figuras 4.31 e 4.32 os resultados mostram a eficiência fracionária para os testes de filtração conduzidos na temperatura ambiente e de 700°C. Pode-se verificar que a eficiência de coleta foi maior para partículas maiores, alcançando 99,9% para $d_p > 8 \mu\text{m}$. É notável uma menor eficiência para partículas abaixo de 2 μm dos testes em 700°C (< 98%). O mesmo foi verificado com os filtros de microfibra de quartzo e filtros cerâmicos fibrosos. Como já dito, mudanças ocorridas nas propriedades físicas do gás, influencia os mecanismos de coleta de partículas pelo filtro e provoca uma mudança estrutural no meio poroso devido à expansão térmica. Este comportamento relacionado aos efeitos reversíveis da expansão térmica durante o aquecimento das membranas a 700°C, causou a dilatação dos poros, aumentando a permeabilidade e promovendo mais facilmente a penetração de partículas menores dentro da estrutura, com a devida redução na eficiência de coleta.

Em relação às Figuras 4.31 e 4.32 foi verificado o “ricochete” das partículas em menor intensidade e somente nos 5 minutos de filtração.

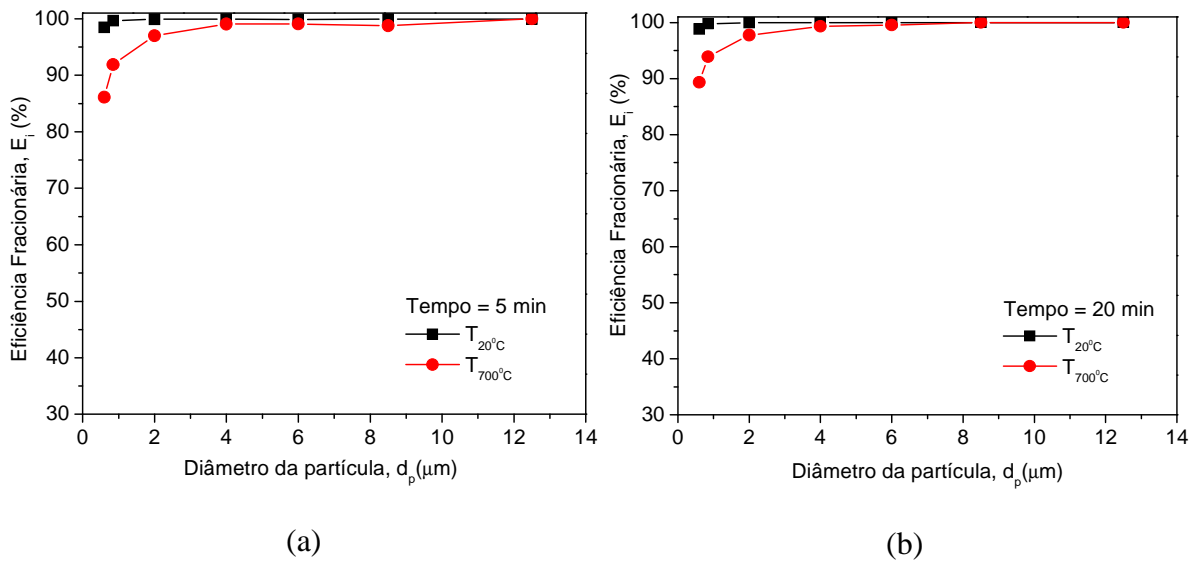


Figura 4.31. (a) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 5 minutos de filtração. (b) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 20 minutos de filtração. Resultados nas $T_{20^{\circ}\text{C}}$ e $T_{700^{\circ}\text{C}}$, com uma velocidade de filtração de 5 cm/s para o filtro cerâmico celular A12.

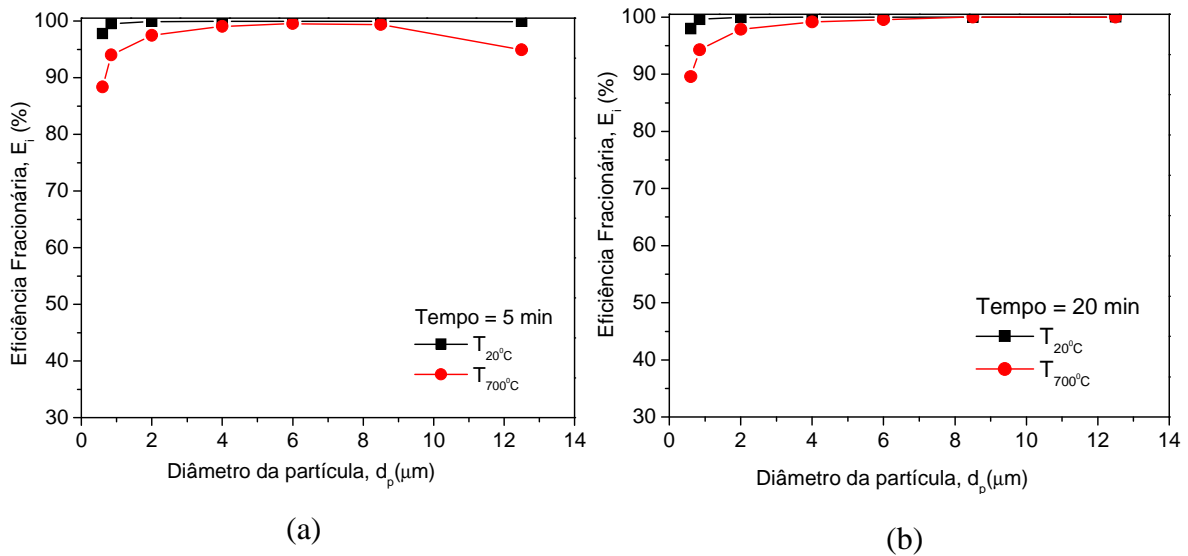


Figura 4.32. (a) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 5 minutos de filtração. (b) Eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado nos 20 minutos de filtração. Resultados nas $T_{20^{\circ}\text{C}}$ e $T_{700^{\circ}\text{C}}$, com uma velocidade de filtração de 5 cm/s para o filtro cerâmico celular A13.

4.3 Comparações do desempenho dos filtros.

Esta secção tem a finalidade de apresentar o desempenho dos filtros associados de acordo com as diferentes estruturas verificadas neste trabalho. Destacando o desempenho dos filtros cerâmicos que apresentaram uma coleta de partículas superior a todos os outros

meios filtrantes realizados a altas temperaturas.

Comparando o desempenho dos filtros sob as mesmas condições de operação, ficou claro que os filtros testados neste trabalho foram muito eficientes para coletas de partículas acima de $2\mu\text{m}$. Apesar da diferença na estrutura dos filtros, a eficiência foi elevada para todas as amostras testadas.

Os resultados indicaram que o filtro cerâmico A12 e A13 foi mais eficiente na coleta de partículas relativamente finas, sendo que na faixa de partículas acima de $0,6\mu\text{m}$, a eficiência foi superior do que a eficiência nos filtros cerâmicos fibrosos e no filtro de microfibras de quartzo. Com exceção do filtro cerâmico fibroso 5A ($\epsilon \cong 0,5$) que apresentou resultados muito parecidos com os filtros cerâmicos A12 e A13. Os resultados mostraram que todos os filtros foram afetados diretamente com a elevação da temperatura, obtendo menores eficiências para temperaturas maiores. Das diferentes estruturas estudadas, na Figura 4.33, encontram-se ilustradas uma comparação do melhor desempenho dentre as diferentes estruturas na T_{ambiente} e $T_{700^\circ\text{C}}$.

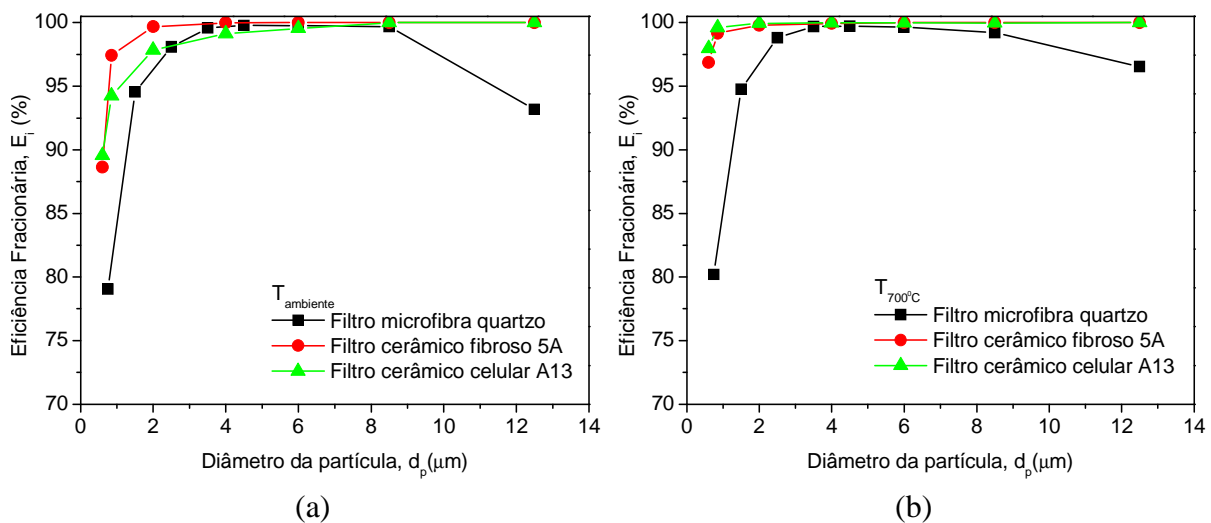


Figura 4.33. Comparação da eficiência de coleta fracionária para os diferentes filtros cerâmicos estudados. a) T_{ambiente} ; b) $T_{700^\circ\text{C}}$.

Pela Figura 4.33 foi observado que somente o filtro de microfibras de quartzo foi o que apresentou o fenômeno de ricochete da partícula para esses meios filtrantes em particular.

Foi observado que os filtros cerâmicos celulares A12 e A13 foram mais eficientes, mas causaram uma queda de pressão superior ao dos filtros cerâmicos fibrosos. Pela Tabela 4.1 e 4.2 podemos observar os valores da permeabilidade Darciana, k_1 e não-

Darciana, k_2 para todos os filtros testados, nas temperaturas estudadas. Observa-se que os filtros cerâmicos A12 e A13 e o filtro de microfibras de quartzo obtiveram uma menor permeabilidade comparada aos filtros cerâmicos fibrosos. O efeito da elevação da temperatura foi menos sensível para o filtro de microfibras de quartzo, enquanto que a proporção foi maior e relativamente parecida para todos os outros filtros testados, com exceção do filtro 5A, que teve um aumento considerável da sua permeabilidade com o aumento da temperatura.

Tabela 4.1. Valores da constante de permeabilidade Darciana, k_1 para os meios filtrantes estudados nas diferentes temperaturas de teste.

Meios Filtrantes	T_{amb} k₁(m²)	T_{300°C} k₁(m²)	T_{700°C} k₁(m²)
Quartzo	1,2. 10 ⁻¹²	1,5. 10 ⁻¹²	2,1. 10 ⁻¹²
Fibroso 1A	7,0. 10 ⁻¹¹	1,6. 10 ⁻¹⁰	1,2. 10 ⁻¹⁰
Fibroso 2D	8,0. 10 ⁻¹¹	2,8. 10 ⁻¹⁰	3,8. 10 ⁻¹⁰
Fibroso 3D	3,1. 10 ⁻¹¹	1,0. 10 ⁻¹⁰	1,5. 10 ⁻¹⁰
Fibroso 5A	1,7. 10 ⁻¹¹	6,0. 10 ⁻¹¹	6,0. 10 ⁻¹⁰
Celular A12	2,9. 10 ⁻¹²	5,3. 10 ⁻¹²	9,5. 10 ⁻¹²
Celular A13	2,4. 10 ⁻¹²	6,5. 10 ⁻¹²	1,3. 10 ⁻¹¹

Tabela 4.2. Valores da constante de permeabilidade não-Darciana, k_2 para os meios filtrantes estudados nas diferentes temperaturas de teste.

Meios Filtrantes	T_{amb} k₂(m²)	T_{300°C} k₂(m²)	T_{700°C} k₂(m²)
Fibroso 1A	1,7. 10 ⁻⁶	1,4. 10 ⁻⁶	1,1. 10 ⁻⁶
Fibroso 2D	8,7. 10 ⁻⁶	8,2. 10 ⁻⁶	9,6. 10 ⁻⁶
Fibroso 3D	4,9. 10 ⁻⁶	1,4. 10 ⁻⁶	7,5. 10 ⁻⁷
Fibroso 5A	2,8. 10 ⁻⁷	2,4. 10 ⁻⁷	1,0. 10 ⁻⁷
Celular A12	1,4. 10 ⁻⁷	1,0. 10 ⁻⁷	9,4. 10 ⁻⁸
Celular A13	6,5. 10 ⁻⁸	3,7. 10 ⁻⁸	5,5. 10 ⁻⁸

Sabe-se que fibras produzem estruturas altamente porosas, entretanto filtros granulares, por outro lado, apresentam uma maior resistência mecânica em consequência de uma menor porosidade. No entanto os filtros fibrosos possuem, contudo, menor resistência mecânica quando comparada aos filtros granulares. Em contrapartida cerâmicas celulares apresentam elevado número de poros abertos e interconectados, resistência a choques e ciclos

térmicos e controlada resistência ao escoamento de fluidos. (INNOCENTINI, 1997).

A Figura 4.34 mostra um mapa adaptado das ligações dos dados de k_1 e k_2 experimentais das diferentes fontes na literatura (INNOCENTINI, *et al.*, 2005). A região que compreende o desempenho dos filtros cerâmicos fibrosos e filtros cerâmicos celulares na Figura 4.34 na T_{amb} , incluem as coordenadas de 6C-6D e D6-D7, respectivamente. Os pontos grifados na Figura mostram a escala resultante de k_1 e de k_2 para os filtros cerâmicos testados neste trabalho comparado às escalas sugeridas como ideais para a filtração do aerossol (Tabela 4.1 e 4.2).

É importante notar que os valores obtidos para a permeabilidade Darciana, k_1 , e não-Darciana, k_2 , para os filtros de microfibra de quartzo e filtros cerâmicos fibrosos pela Figura 4.34 estão na ordem de grandeza esperada para filtração de aerossóis. No caso dos filtros cerâmicos celulares A12 e A13 os valores das constantes de permeabilidade ficaram fora da faixa apropriada para filtração de gases quentes segundo INNOCENTINI *et al.*, 2005. Entretanto, como se trata de um estudo no entendimento do seu desempenho, os filtros cerâmicos celulares podem ser reestruturados considerando outras características também importantes, tais como o tamanho do poro, porosidade e a resistência mecânica, a fim de melhorar o escoamento do fluido.

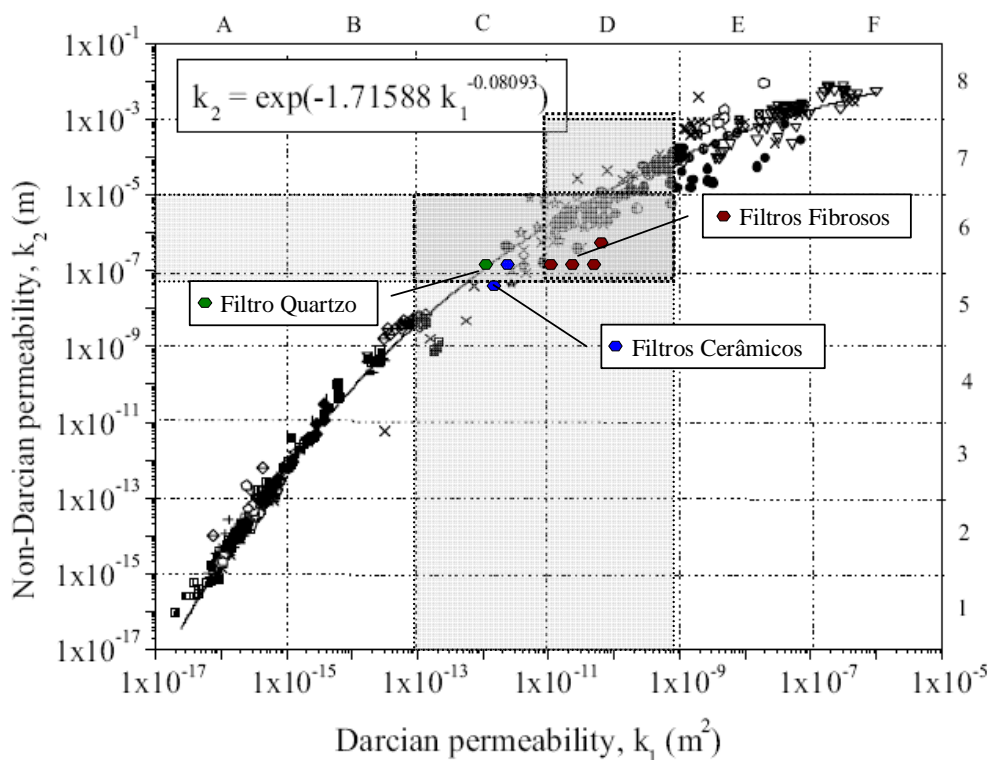


Figura 4.34. Valores das constantes de permeabilidade reunidas na literatura para vários materiais porosos na filtração de aerossóis comparados com os dados obtidos para os filtros cerâmicos na T_{amb} (INNOCENTINI *et al.*, 2005).

O que podemos concluir deste trabalho é que todos os filtros estudados apresentaram os requisitos básicos para atuarem na filtração de gases em altas temperaturas. Foram apresentadas diferentes estruturas e novas possibilidades são deixadas a fim de se obter maiores estudos em trabalhos de gases quentes.

4.4 Propostas de correlação para previsão da queda de pressão e eficiência de coleta fracionária para o filtro de microfibras de quartzo.

Neste trabalho foi apresentada uma ampla aplicação de filtros cerâmicos e a sua eficácia no trabalho de filtração a altas temperaturas. No que diz respeito ao comportamento dos filtros de microfibras de quartzo na filtração de gases são assuntos pouco explorados na literatura, principalmente em trabalhos a altas temperaturas. No sentido de atingir o objetivo proposto e obter um melhor entendimento dessa estrutura em relação à variação de temperatura foram propostas novas correlações para a permeabilidade e para a eficiência de coleta para representar o comportamento experimental para o filtro de microfibras de quartzo.

4.4.1 Comparação entre o comportamento experimental e calculado por correlações da literatura da curva de queda de pressão em função de velocidade superficial.

A previsão e medida da permeabilidade são essenciais no projeto e operação de processos de manufatura dos compostos. As características dos meios fibrosos são relacionadas com as propriedades do fluido e da fibra. A permeabilidade é analisada geralmente baseada nos modelos teóricos desenvolvidos para meios porosos. Muitos estudos teóricos e experimentais descrevem o fluxo em meios fibrosos (CHOI, *et al.*, 1998). Entretanto as correlações para meios porosos fibrosos por não serem tão comuns como os granulares, foram menos estudados e muito menos se sabe sobre como a estrutura do meio pode influenciar na sua resistência ao escoamento dos meios fibrosos. Embora o desempenho destes tenha sido estudado, alguns comportamentos ainda são pouco conhecidos (VAN OSDELL *et al.*, 1990; LISBOA, 2001).

A dificuldade em correlacionar a permeabilidade para meios fibrosos está relacionada a fatores estruturais como orientação e arranjo entre fibras, os quais são funções do método de empacotamento (CAETANO, 1992). Não obstante, trabalhos publicados sobre o estudo das constantes de permeabilidade a temperaturas altas ainda está

escasso.

A Figura 4.35 representa a comparação entre o comportamento experimental e o calculado por correlações da literatura para estimativa dos dados de queda de pressão para o meio fibroso estudado. Nestas curvas, os parâmetros estruturais utilizados (porosidade, diâmetro da fibra) foram baseados na porosidade total dos meios filtrantes. Quatro curvas teóricas foram plotadas em todas as figuras: (i) a correlação de IBERALL (1950) (Eq.2.4), (ii) a correlação de DAVIES (1952) (Eq.2.5), (iii) a correlação de JACKSON & JAMES (1982) (Eq. 2.8), (iv) a correlação de WESTHUIZEN E DU PLESSIS (1996) (Eq. 2.10).

Os valores dos desvios médios das correlações testadas foram calculados pela seguinte relação:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{ex} - y_{cal}}{y_{ex}} \right| \cdot 100 \quad (4.1)$$

onde y_{ex} e y_{cal} são os valores experimentais e calculados respectivamente.

Para uma melhor visualização, os desvios calculados para as correlações testadas, estão apresentados em forma de tabela (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Valores dos desvios médios máximos das correlações testadas.

Equação	Desvios Máximos δ (%) ^a							
	T _{21°C}	T _{102,6°C}	T _{200,6°C}	T _{301,4°C}	T _{408,6°C}	T _{500,5°C}	T _{602,2°C}	T _{702,7°C}
IBERRALL (1950)	1123	1171	1279	1328	1502	1592	1758	1920
DAVIES (1952)	2404	2501	2722	2822	3177	3360	3698	4028
JACKSON & JAMES (1986)	414	434	480	500	573	611	680	748
WESTHUIZEN E DU PLESSIS (1996)	56	62	76	82	104	116	137	158

$$^a \delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{ex} - y_{cal}}{y_{ex}} \right| \times 100; \text{ onde } y_{ex} \text{ e } y_{cal} \text{ são os valores experimental e calculado.}$$

De um modo geral os modelos testados superestimaram os dados experimentais, verificando que as correlações testadas não foram apropriadas para estimar a queda de pressão para o filtro de microfibra de quartzo.

Observando-se a Figura 4.35 verifica-se um mesmo perfil das curvas tanto para os dados experimentais quanto para as correlações propostas pela literatura para todas as temperaturas de teste, o que indica uma maior facilidade em obter um melhor caminho para se chegar a uma correlação que represente os dados experimentais. Com relação à influência da

temperatura, verifica-se que os desvios aumentaram com o aumento da temperatura para todas as correlações testadas.

A partir dos dados experimentais obtidos neste estudo, e baseado na clássica equação de DAVIES (1952) Eq.2.5, através de uma série de combinações foi obtido um ajuste dos dados experimentais representado pela equação 4.2, onde uma dependência da temperatura em k_1 foi incluída. Na Figura 4.36 podem ser observados os comportamentos dos dados experimentais obtidos pela correlação proposta para as diferentes temperaturas de teste.

$$-\frac{dP}{dl} = \frac{\mu \cdot v_s \cdot f(\phi)}{d_f^2} \quad (4.2)$$

onde $f(\phi) = 64 \cdot \phi^a (1 + 56 \cdot \phi^b)$, $\phi = 1 - \varepsilon$

$a = 0,0017 \cdot T + 3,72$; $b = -0,0017 \cdot T + 3,85$ com T em $^{\circ}\text{C}$.

Como verificado, a correlação 4.2 estima de forma adequada os dados da queda de pressão para o meio fibroso, apresentando desvios médios máximos para os meios estudados menores que 15%, sendo estes desvios apresentados na Tabela 4.4. Quando comparado com os desvios médios obtidos pelas correlações estudadas (Tabela 4.3), pode-se observar que a correlação proposta (Eq. 4.2) representa de forma eficiente os dados experimentais.

Tabela 4.4. Máximo dos desvios da correlação proposta (Eq. 4.2).

Equação	Desvios Máximos δ (%) ^a							
	T _{21°C}	T _{102,6°C}	T _{200,6°C}	T _{301,4°C}	T _{408,6°C}	T _{500,5°C}	T _{602,2°C}	T _{702,7°C}
Correlação Proposta	12,7	13,6	12,7	14,9	12,5	13,9	13,8	14,7

$${}^a \delta = \frac{1}{n} \sum_1^n \left| \frac{(y_{ex} - y_{cal})}{y_{ex}} \right| \times 100; \text{ onde } y_{ex} \text{ e } y_{cal} \text{ são os valores experimental e calculado.}$$

Para se prever a queda de pressão em um meio fibroso foi calculada a constante de permeabilidade, k_1 , pela equação proposta (Eq. 4.2). A comparação da constante de k_1 obtida através da correlação 4.2 e a obtida experimentalmente são mostradas na Figura 4.37.

Pode-se notar que esta equação foi apropriada para estimar a constante de permeabilidade em um meio fibroso. A nova equação proposta para estimar a permeabilidade representou muito bem os dados experimentais e a sua influência nestes parâmetros com a temperatura, apresentou desvios médios máximos para o meio estudado em torno de 5,9%.

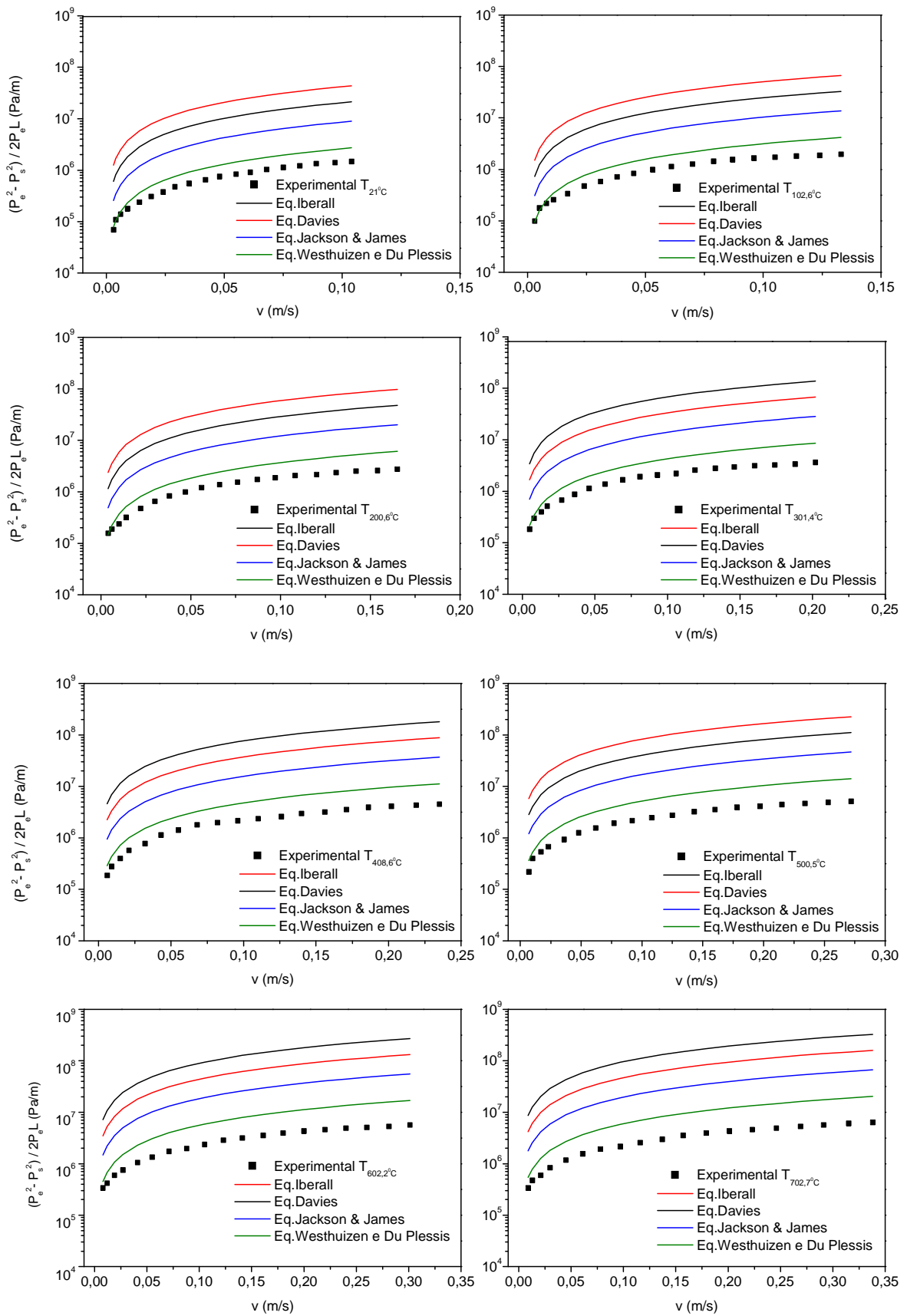


Figura 4.35. Comparação entre os dados experimentais e as curvas previstas pelos modelos da literatura para o filtro de microfibras de quartzo, utilizando a porosidade total, diâmetro de fibra e viscosidade do leito nas temperaturas de testes.

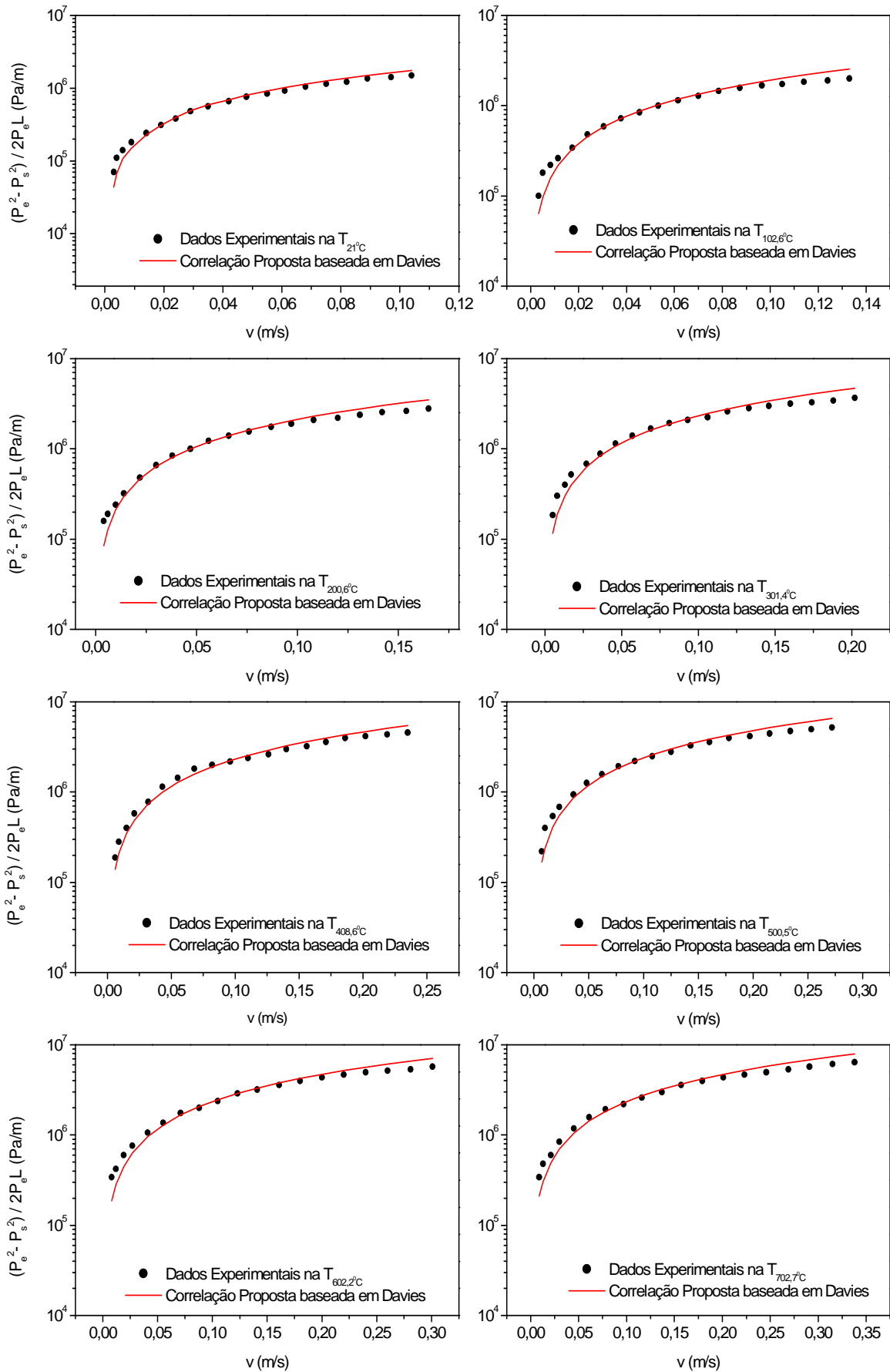


Figura 4.36. Comparação entre os dados experimentais e as curvas previstas pela equação proposta (4.2) para o filtro de microfibras de quartzo nas diferentes temperaturas de teste.

Uma dependência complexa entre os parâmetros estruturais do meio (porosidade, diâmetro da fibra) e a temperatura pode explicar estes comportamentos diferentes de como k_1 é fortemente dependente da porosidade do filtro. Sabe-se, por exemplo, que dentro da mudança de temperatura deste trabalho, uma expansão térmica da fibra para o quartzo seria da ordem de 5% (HALLIDAY *et al.*, 2001).

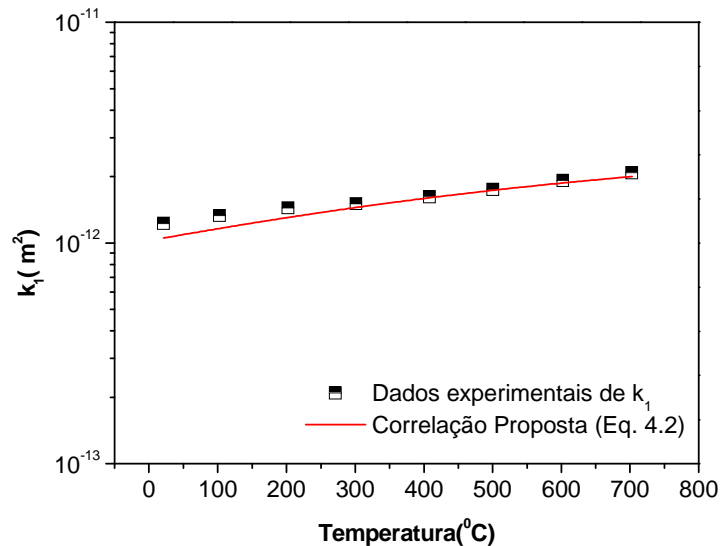


Figura 4.37. Comparação dos dados experimentais de k_1 com os obtidos pela correlação proposta (Eq. 4.2) para o filtro de fibra de quartzo nas diferentes temperaturas.

4.4.2 Correlação para a eficiência de coleta fracionária para o filtro de microfibras de quartzo.

No trabalho de FREITAS *et al.*, 2006, a autora propõe uma correlação para os seus dados experimentais trabalhando com filtros cerâmicos granulares de dupla camada, que consistem de um suporte cerâmico com uma membrana depositada. Esta membrana filtrante apresenta tamanho de poros capaz de evitar a penetração do material, sendo fina o suficiente para minimizar os efeitos da perda de carga. A correlação proposta segundo a autora representou bem o comportamento experimental respondendo de forma satisfatória às mudanças nas condições experimentais em relação à temperatura.

Baseado no trabalho de FREITAS *et al.*, 2006, busca-se um novo ajuste da correlação da autora que represente a eficiência de coleta fracionária dos resultados obtidos para o filtro de microfibras de quartzo analisada de acordo com os vários mecanismos de coleta. Essa correlação proposta por FREITAS *et al.*, 2006, não poderia ser usada diretamente neste caso por ser um meio filtrante de estrutura diferente do filtro em questão.

Uma vez que as correlações propostas são válidas para filtros granulares buscase desta forma verificar o seu ajuste para estimar os dados experimentais obtidos com o filtro fibroso em estudo, que apresentaram um perfil característico aos dados experimentais da autora citada.

As expressões utilizadas foram derivadas da literatura baseadas em correlações semi-empíricas válidas somente para o estágio inicial de filtração, uma vez que não leva em consideração a interferência das partículas já retidas no filtro.

A partir dos dados experimentais obtidos neste estudo e tendo como base o modelo de eficiência de um único coletor, Eq. 2.59 (TIEN, 1989), uma série de combinações foi testada para representar os dados experimentais. Como resultado específico deste estudo, foi necessário a inclusão de um parâmetro empírico adimensional a , onde uma dependência com a temperatura foi incluída. Portanto a expressão resultante para a eficiência de coleta para o filtro em estudo pode ser escrita na seguinte forma:

$$E = 1 - \exp\left[\frac{-a.K_1.L.(1-\varepsilon)\eta_T}{d_f}\right] \quad (4.3)$$

onde L a espessura do meio filtrante, d_f é o diâmetro da fibra, e ε a porosidade do meio filtrante na temperatura ambiente.

E “ a ” é uma constante ajustada (no caso desse trabalho), dada pela seguinte expressão:

$$a = -7.10^{-5}.T^2 + 0,06.T + 13 \quad (4.4)$$

onde T é a temperatura de teste.

O parâmetro K_1 é expresso por:

$$K_1 = \left(\frac{6}{(1-\varepsilon)^{2/3}}\right)^{1/3} \quad (4.5)$$

Assume-se que a eficiência de coleta total de um único coletor é dada pela soma de todas as eficiências devidas aos mecanismos atuantes (DUARTE FILHO *et al.*,

2000), dada pela Eq. 2.41, desconsiderando o mecanismo eletroforético, têm-se:

$$\eta_T = \eta_D + \eta_I + \eta_{ID} + \eta_G \quad (4.6)$$

onde,

η_D – eficiência mecanismo difusional;

η_I – eficiência mecanismo inercial;

η_{ID} – eficiência mecanismo de interceptação direta;

η_G – eficiência mecanismo gravitacional;

O mecanismo difusional, (η_D) foi calculado segundo a Equação 2.16 correlação proposta por TIEN, 1989.

O mecanismo inercial, (η_I) dominante para altas velocidades do gás foi baseado na expressão proposta por JUNG *et al.* 1989, ajustada neste trabalho apresentada na forma da equação 73:

$$\eta_{I,D} = 0,25 \cdot N_{Steff}^{0,1} \cdot N_R^{0,05} \quad (4.7)$$

onde N_{Steff} , e N_R são o parâmetro relativo a tamanho e o número de Stokes efetivo respectivamente, calculados pela equação 2.26 e 2.27.

O mecanismo de interceptação direta, (η_{ID}) foi baseado na expressão proposta por PARETSKY *et al.* 1971 também ajustado neste trabalho, dada por:

$$\eta_{ID} = 0,53 \cdot \left(\frac{d_p}{d_f} \right)^{0,05} \quad (4.8)$$

onde d_f é o diâmetro médio da fibra e d_p é o diâmetro da partícula .

O mecanismo gravitacional, (η_G) resultado do efeito da gravidade sobre a partícula foi obtida a partir da relação proposta por PARETSKY *et al.*, 1971. A Equação 2.37 foi usada para o cálculo da eficiência de coleta pelo mecanismo gravitacional para escoamento ascendente.

Neste trabalho, a expressão original da Equação 4.6 foi modificada levando em conta a probabilidade de adesão da partícula (γ). Sendo assim a expressão para o cálculo da eficiência de coleta total é corrigida por:

$$\eta_T' = \gamma \cdot \eta_T \quad (4.9)$$

Esse fenômeno difícil de quantificar foi definido por alguns autores como uma nova variável, denominada probabilidade de adesão (γ). YOSHIDA E TIEN (1985) observaram que para a eficiência de coleta diminui a partir de um número de Stokes crítico, devido provavelmente ao ricochete da partícula. Propôs então CAVENATI e COURRY (1998) uma nova probabilidade de adesão, onde incorporaram a influência das dimensões do filtro nos parâmetros. Baseados nesses estudos os autores propuseram:

$$\begin{aligned} \gamma &= 1 && \text{se } N_{\text{Steff}} < 10^{-2} \quad \text{e} \\ \gamma &= \alpha_1 \left(\frac{L}{D}\right)^{\alpha_2} N_{\text{Re}}^{\alpha_3} N_{\text{Steff}}^{\alpha_4} && \text{se } N_{\text{Steff}} > 10^{-2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

As constantes α_1 a α_4 para esse trabalho foram ajustados dos dados experimentais, sendo respectivamente:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 4,41 \cdot 10^{-4}; \alpha_2 = -0,09; \\ \alpha_3 &= -0,1; \alpha_4 = 0,5. \end{aligned}$$

Através da equação 4.3 foi estimada a eficiência de coleta do filtro de microfibras de quartzo para cada tamanho de partícula de acordo com as condições operacionais estudadas. Na Figura 4.38 observa-se o comportamento dos dados obtidos experimentalmente e o modelo proposto (Eq. 4.3).

O modelo ofereceu bons ajustes comparados com os dados experimentais, apresentando desvios médios de 3,8% na T_{amb} , 1,6% na $T_{298,5^\circ\text{C}}$ e 0,8% na $T_{698,5^\circ\text{C}}$ para o filtro de microfibras de quartzo. A correlação proposta para a eficiência de coleta fracionária representou bem o comportamento experimental para o filtro de microfibras de quartzo, respondendo de forma satisfatória as mudanças nas condições experimentais com relação à temperatura.

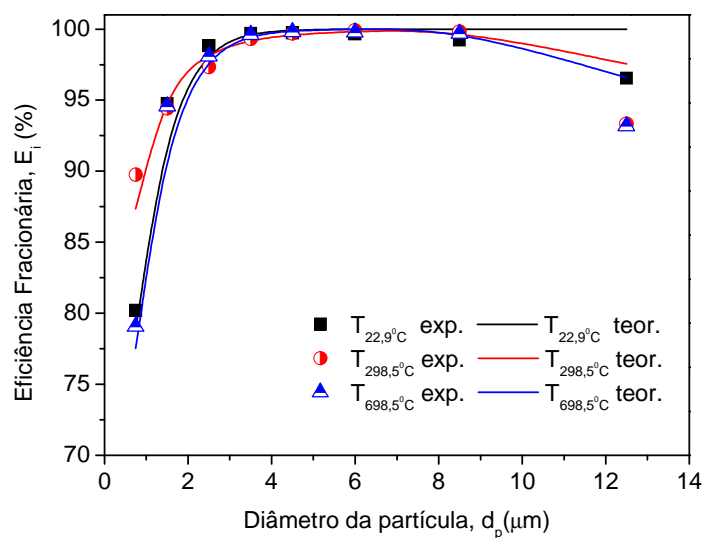


Figura 4.38. Comparação entre o modelo previsto pela Equação 4.3 e as curvas experimentais da eficiência de coleta fracionária para o filtro de microfibras de quartzo nas três temperaturas investigadas.

5. CONCLUSÕES

Os ensaios de permeabilidade e de eficiência de coleta dos filtros a altas temperaturas permitiram compreender o desempenho das diferentes estruturas cerâmicas, fornecendo parâmetros importantes sobre as possibilidades de atuação dos filtros cerâmicos em trabalhos realizados em ambientes hostis. Dos resultados apresentados no presente trabalho conclui-se que:

- A permeabilidade do filtro foi afetada diretamente pelo aumento da temperatura para todos os filtros cerâmicos. Foi observada uma dependência de crescimento de k_1 com a temperatura. Uma explicação para tal comportamento condiz com a elevação da temperatura que modificou a estrutura do meio poroso (porosidade (ϵ) diâmetro da fibra (d_f)), razão de uma provável dilatação térmica que ocasionou em uma alteração da estrutura dos filtros cerâmicos testados influenciando a sua permeabilidade, proporcionando uma maior facilidade de passagem pelo fluido.
- Um aumento linear na queda de pressão quando do aumento da velocidade foi obtido para o filtro de microfibras de quartzo. As tendências razoavelmente lineares indicaram a predominância das forças viscosas. Neste caso a constante Darciana, k_1 foi obtida através do ajuste da Equação 2.1 que considera apenas o termo linear (Equação de Darcy). Não foi utilizada a Equação de Forchheimer para o filtro de microfibras de quartzo devido os dados não apresentarem tendência parabólica. Entretanto para os filtros cerâmicos fibrosos e filtros cerâmicos celulares o que foi verificado é que ocorreu um aumento não linear na queda de pressão com o aumento da velocidade. Os dados apresentaram uma tendência parabólica e desta forma foi possível obter o primeiro e o segundo termo da Equação de Forchheimer (Eq. 2.2). Sendo que a dependência entre as constantes de permeabilidade e a temperatura foi bem ajustada por um polinômio de segunda ordem.
- O efeito da elevação da temperatura para o filtro de microfibras de quartzo mostrou que para uma mesma velocidade do gás, aumentou a queda de pressão no filtro na medida em que ocorreu a elevação de temperatura. Neste caso como a constante de permeabilidade k_1 aumenta com a elevação da temperatura

(indica a maior facilidade à passagem do fluido pelo filtro), e a perda de carga também aumenta com a temperatura, essa incoerência foi devido a alterações ocorridas nas propriedades do ar (viscosidade do fluido), e da estrutura cerâmica com o aumento da temperatura. Foi verificado que o valor da constante darciana, k_1 com a elevação da temperatura foi inferior do que o efeito causado pela temperatura na viscosidade do fluido, razão pela qual ocasionou em um aumento da perda de carga pelo filtro. Diferente do que foi observado com o filtro de microfibras de quartzo, a tendência da queda de pressão foi o de diminuir com o aumento da temperatura para a mesma velocidade do fluido para os filtros cerâmicos fibrosos e os filtros cerâmicos celulares estudados.

- No geral, que todos os valores obtidos das constantes de permeabilidade Darciana, k_1 , e constantes de permeabilidade não- Darciana, k_2 representaram os valores de ordem de grandeza esperados para filtros de gases a altas temperaturas e estão na ordem de magnitude esperada para filtros industriais em trabalhos com gases quentes. Os resultados mostraram, entretanto que os filtros cerâmicos fibrosos foram sem dúvida mais permeáveis do que o filtro de microfibras de quartzo e os filtros cerâmicos celulares.

- Os testes de filtração indicaram uma dependência clara entre eficiência de filtro e temperatura de teste: sendo obtidas eficiências menores com a elevação da temperatura do gás. Altas eficiências de coleta foram alcançadas e as mesmas são sensíveis à temperatura. Foram obtidas eficiências de coleta acima de 95% para partículas na faixa de 2-10 μm para o filtro de microfibras de quartzo e acima de 98% para os filtros cerâmicos fibrosos e celulares nas temperaturas estudadas. Menores eficiências de coleta para maiores temperaturas foram devidos a uma provável expansão térmica da estrutura do filtro que ocasionou em uma dilatação temporária dos canais porosos para o escoamento do fluido. Pode-se afirmar também que o aumento de temperatura provocou alterações nas propriedades do gás (diminuição da densidade e aumento da viscosidade) que alteraram a capacidade de coleta do filtro.

- A eficiência aumentou com o tempo de filtração e diminuiu com o aumento na temperatura de gás. Nenhuma mudança substancial na eficiência foi

observada com o aumento na temperatura, confirmando a integridade das membranas de filtração de microfibras de quartzo, cerâmicos fibrosos e cerâmicos celulares.

- O fenômeno de ricochete das partículas, característicos para as regiões onde predomina o mecanismo inercial, foi verificado experimentalmente para os filtros cerâmicos estudados, em maior destaque para o filtro de microfibras de quartzo em todas as temperaturas.
- Os filtros cerâmicos apresentaram características favoráveis no emprego para a filtração de gases quentes. Embora uma diminuição na eficiência aconteça com o aumento da temperatura, os níveis de remoção de material particulado permanecem altos e a queda de pressão aceitáveis dentro da faixa estudada.
- Dos modelos teóricos desenvolvidos para meios porosos fibrosos testados, verificou-se que não são apropriadas para estimar a dependência da permeabilidade do filtro de microfibras de quartzo com a temperatura. De um modo geral os modelos testados superestimaram os dados experimentais e com relação à influência da temperatura verificou-se que os desvios aumentaram com a elevação da temperatura para todas as correlações testadas.
- Uma correlação simples, baseada na clássica equação de DAVIES (1952), para estimar a permeabilidade representou muito bem os dados experimentais e a sua influência nestes parâmetros com a temperatura, apresentando desvios médios máximos para o meio estudado em torno de 5,9%.
- A correlação proposta para a eficiência de coleta fracionária, que inclui a dependência da eficiência com a temperatura e uma vez que as correlações propostas são válidas para filtros granulares, representou bem o comportamento experimental para o filtro de microfibras de quartzo, reproduzindo de forma satisfatória as mudanças nas condições experimentais com relação à temperatura.

6. SUGESTÕES

A partir das conclusões obtidas nesse trabalho e como forma de dar continuidade nesta mesma linha de estudo sugere-se:

- Analisar a eficiência de coleta dos filtros cerâmicos em outras condições de filtração (velocidade, concentração e tempo de filtração);
- Estudar o condicionamento dos filtros cerâmicos. Realizar testes de filtração (ciclos) e regeneração seria adequado para verificar o condicionamento e limpeza sobre os parâmetros de regeneração dos filtros cerâmicos;
- Verificar a dilatação térmica dos filtros durante os ensaios a altas temperaturas;
- Verificar a resistência mecânica dos filtros cerâmicos;
- Verificar a validade da correlação proposta neste trabalho para a perda de carga do filtro de microfibras de quartzo para os outros meios cerâmicos;
- Verificar a validade da correlação proposta para a eficiência de coleta fracionária neste trabalho para outras condições de filtração (velocidade, concentração e tempo de filtração);
- Propor uma correlação empírica geral que estime a eficiência de coleta fracionária em função da temperatura para os filtros cerâmicos fibrosos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGRANOVSKI, I. E.; SHAPIRO, M., Clogging of wet filters by dust particles, **Journal of Aerosol Science**, vol.32, p.1009-1020, 2001.
- AGUIAR, M. L. Filtração de ar em filtros de tecido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química-Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1991.
- ALLEN, M. D.; RAABE, O.G., Slip correction measurements of spherical solid aerosol particles in an improved Millikan apparatus, **Aerosol Sci. Technol.** vol.4, p.269-286, 1985.
- AL-OTOOM, A. Y., Prediction of the collection efficiency, the porosity, and the pressure drop across filter cakes in particulate air filtration. **Atmospheric Environment**, vol. 39 p. 51–57, 2005.
- ALVIN, M. A., Advanced ceramic materials for use in high-temperature particulate removal systems. **Ind. Eng.Chem.Res.** vol. 25, p. 3384-3398, 1996.
- ANTUNES, W. L. Preparação e Caracterização de Elementos Filtrantes Cerâmicos para a Filtração de Gases Quentes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 1997.
- BRAUN, S., APPEL, L. G., SCHMAL, M., A poluição gerada por máquinas de combustão interna movida à diesel- A questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Química Nova**, vol. 27(3), p. 472-482, 2003.
- BROWN, R. C., Air Filtration: An integrated approach to the theory and applications of fibrous filters, Pergamon Press, UK, 1993.
- BUSTNES, T.E., MACKLEY, M. R. The capture and release of biomass using a high voidage fibrous filter (marked revision). **Chemical Engineering Science** vol. 60 p.5206 –

5218, 2005.

CAETANO, I. K., Permeabilidade em meios fibrosos. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 1992.

CALLÉ, S., CONTAL, P., THOMAS, D., BÉMER, D., LECLERC, D. Evolutions of efficiency and pressure drop of filter media during clogging and cleaning cycles. **Powder Technology**, vol.128, p. 213-217, 2002.

CAVASSENO, V. Industrial Air Pollution Engineering, McGraw-Hill, USA, 1980.

CHEN, C. Y. Filtration of Aerosols by Fibrous Media, Chemical Reviews 55, p.595- 623, 1955.

CHEUNG, W., Filtration and Cleaning Characteristics of Ceramic Media, PhD. Thesis, University of Surrey, 1989.

CHOI, M.A.; LEE, M.H.; CHANG, J. LEE, S. J. Permeability modeling of fibrous media in composite processing, **Journal Non-Newtonian Fluid Mech.**, vol.79, 585-598, 1998.

CHUAH, T.G., WITHERS C.J, SEVILLE J.P.K. Prediction and measurements of the pressure and velocity distributions in cylindrical and tapered rigid ceramic filters. **Separation and Purification Technology**, vol. 40, p. 47–60, 2004.

COURY, J.R.. Electrostatic Effects in Granular Bed Filtration of Gases, 1983. Ph.D. Thesis, Cambridge University, UK, 1983.

DAVIES, C.N. The separation of air-borne dust and particles. **Proc. Inst. Mech. Eng. B1**, p.185-198, 1952.

DITTLER, A. UMHAUER, H. F., Influence of conditioning and regeneration on the separation behaviour of rigid surface filters for the separation of particles from gases. **Powder Technology**, vol. 120, p.223-231, 2001.

- DUARTE FILHO, O. B.; MARRA JR, W. D.; KACHAN, G. C.; COURY, J. R. Filtration of electrified solid particles, **Industrial Engineering Chemistry Research**, vol. 39 (10), p. 3884-3895, 2000.
- DULLIEN, F. A. L. Porous Media- Fluid Transport and Pore Structure, 1^a ed. Ontário, Canadá, Academic Press, 1992.
- ERGUN, S. Flow Through Packed Columns, **Chemical Engineering Progress**, vol. 48(2), p. 89-94, 1952.
- FERNANDO, J. A.; CHUNG, D. D. L. Pore Structure and Permeability of na Alumina Fiber Filter Membrane for Hot Gas Filtration, **Journal of Porous Materials**, vol. 9, p. 211-219, 2002.
- FREITAS, N. L. Estudo de Filtros Cerâmicos de Dupla Camada para Filtração de Aerossóis em Altas Temperaturas. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2003.
- FREITAS, N. L.; SALVINI, V. R.; INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C.; COURY, J. R. Desenvolvimento de filtros cerâmicos para filtração de gases a altas temperaturas: Estudo da permeabilidade, Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Natal-RN, 2002.
- FREITAS, N. L.; MANEIRO, M. G.; COURY, J. R.; Filtração de aerossóis em altas temperaturas utilizando filtros cerâmicos de dupla camada: influencia do diâmetro de partícula na eficiência de coleta, **Cerâmica** vol. 50, p.355-361, 2004.
- FREITAS, N. L.; GONÇALVES, J. A. S.; INNOCENTINI, M. D. M.; COURY, J. R.; Development of a double-layered ceramic filter for aerosol filtration at high-temperatures: The filter collection efficiency, **Journal Hazardous Materials**, vol.136(3) p.747-756, 2006.
- FOX, R. W., MCDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Rio de Janeiro: LTC- Livros técnicos e científicos, editora S. A., 1995.

FUCHS, N.A. The Mechanics of Aerosol. Pergamon Press, 1964.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. Cellular solids-structure and properties. Cambridge University Press, 1997.

GRAEF, A., STENHOUSE, J.T.I., WALSH D.C. The effect of solid aerosol on pre-filter material performance. **Journal of Aerosol Science**, vol. 26 (1), p.S741-S742, 1995.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. Fundamentos da Física. John Wiley, NY, p.352, 2001.

HENRIQUEZ, V., MACIAS-MACHIN, A. Hot gas filtration using a moving bed heat exchanger-filter (MHEF). **Chemical Engineering and Processing**, vol. 39, p. 353-361, 1997.

HINDS, W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles. Wiley Interscience, New York, 1998.

IBERALL, A. S., Permeability of glass woll and other highly porous media. **Journal of Reserch of the National Bureau of Standrs**, vol. 45(5), p. 398-406, 1950.

INNOCENTINI, M. D. M. Filtração de gases a altas temperaturas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 1997.

INNOCENTINI, M.D.M.; PARDO, A.R.F.; SALVINI, V. R.; PANDOLFELLI, V.C. How accurate is Darcy's Law for refractories. **The American Ceramic Society Bullrin**, November, 1999

INNOCENTINI, M. D. M., SEPULVEDA, V. ,SALVINI, P.. R., PANDOLFELLI, V. C., Permeability and Structure of Cellular Ceramics: A Comparison Between two Preparatin Techniques. **J. Am. Ceram. Soc.** vol. 81(12), p. 3349-3352, 1998.

INNOCENTINI, M.D.M., SILVA, M.G.B., MENEGAZZO, A., PANDOLFELLI, V.C. Permeability of refractory castables at high temperature, **J. Am. Ceram. Soc.**, vol.84 (3)

p. 645-47, 2001.

INNOCENTINI, M.D.M., SEPULVEDA, P., ORTEGA, F. Permeability of cellular ceramics. In: SCHEFFLER, Michael; COLOMBO, Paolo. (Org.). Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications. Berlin, Germany, vol. 1, p.313-342, 2005.

JACKSON, G.W., JAMES, D.F. The permeability of fibrous porous media. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. vol. 64, p.364-374, 1986.

JAPUNTICH, D.A.; STENHOUSE, J.I.T., LIU, B.Y.H. Experimental results of solids monodisperse particle clogging of fibrous filters. **Journal of Aerosol Science**, vol.25 (2), p.385-393, 1994.

JUNG, Y.; WALATA S. A., TIEN C., Experimental determination of the inicial collection efficiency of granular beds in the inertial-impaction-dominated region, **Aerosol Sci. Technol.** vol.11, p.168-182, 1989.

KAY, J. M., NEDDERMAN, R. M, Fluid Mechanics and Transfer Processes. Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

KIRCHSTETTER, T. W., CORRIGAN, C. E., NOVAKOV, T., Laboratory and field investigation of the adsorption of gaseous organic compounds onto quartz filters. **Atmospheric Environment**, vol.35 p.1663-1671, 2001.

KOUIMTZIS, T; SAMARA, C., The Handbook of Enviroment Chemistry. ed. Airbone particulate matter. Berlin, Springer-VERlag, 1995.

LATELLA, B.A., HENKEL, L. MEHRTENS, E. G. Permeability and high temperature strength of porous mullite-alumina ceramics for hot gas filtration. **Journal Mater SCI**, vol. 41, p. 423-430, 2006.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H., "Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters", **Aerosol Science and Technology**, vol.1, p.147-166, 1982 a.

LEE, K. W.; LIU, B. Y. H., “Experimental study of aerosol filtration by fibrous filters”, **Aerosol Science and Technology**, vol.1, p.35-46, 1982 b.

LEE, K.W.; RAMAMURTHI, M. Filter Collection, in: *Aerosol Measurement* p. 201 (eds. K. Willeke e P.A. Baron), Van Nostrand, NY, 1993.

LISBOA, E. F. A. Uma Abordagem Multi-Escala para o Cálculo da Permeabilidade Longitudinal de Meios Porosos Fibrosos Randômicos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro-RJ, 2001.

LORA, E.E.S. Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte. Editora Interciência, 2^a ed. Rio de Janeiro, 2002.

MACDONALD, I. F., EL-SAYED, M. S., MOW, K. DULLIEN, F. A. L. Flow Through Porous Media - the Ergun Equation Revisited, **Ind. Eng. Chem. Fundam.**, vol.18(3), p.199-207, 1979.

MARTINS, J. C. Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2001.

MATTESON, M. J., *Filtration: Principles and Practises*. New York, Marcel Dekker Inc.,1987.

MIGUEL, A. F. Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles, **Journal of Aerosol Science**, v. 34, p. 783-799, 2003.

MOREIRA, F.L. Estudo da vibração mecânica na remoção de tortas de filtração em filtros de manga. Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1998.

MOREIRA, E. A.; COURY, J. R., The influence of structural parameters on the permeability of ceramic foams, **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.21, p.23-33, 2004.

PARETKSY, L.; THEODORE, L.; PFETTER, R.; SQUIRES, A. M., Panel bed filters for

simultaneous removal of fly ash and sulphur dioxide. 2: Filtration of dilute aerosols by sand beds, **J.A.P.C.A.**, vol. 21 (4) p.204, 1971.

PEUKERT, W. I., High Temperature Filtration in the Process Industry, **Filtration & Separation**, June p.461-464, June, 1998.

PILZ, T.; Particle properties relevant for hot gas cleaning with rigid barrier filters and their characterization at high temperature, **High temperature gas cleaning**, Schimidt (ed), p.132-144, 1996.

RAHLI, O., TADRIST, L., MISCEVIC, M. Experimental Analysis of Fibrous Porous Media Permeability, **AIChE Journal**, vol 42, p. 3547-3549, 1996.

RAMBO, C.R., MULLER, D., ACCHAR W., SILVA G.M.C., MOREIRA E.A., COURY J.R., HOTZA D. High Temperature Properties of Fibrous Ceramic Filters In: 10th International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, 2007, Berlin-Germany. International Conference and Exhibition of the European Ceramic Society, 2007.

REID, R. C., PRAUSNITZ, J. M., POLING, B. E., The properties of gases e liquids- McGraw- Hill International Editions, 4 ed., 1989.

REIJNEN, K.; BRAKEL, J. V. Gas cleaning at high temperatures and high pressures: A review. **Powder Technology**, vol. 40(1), p. 81-111, 1984.

REMBOR, H.-J., KASPER, G. Fibrous filter – measurements of spatial distribution of deposited particle mass, pressure drop and filtration efficiency. III World Congress on Particle Technology, 1996.

RODRIGUES, V.P. ; SILVA, G. M. C. ; ROMANO, R.C.O. ; PILEGGI, R. G. ; COURY, J. R.; INNOCENTINNI, M. D. M. Performance evaluation of cellular ceramic membranes for hot aerosol filtration. In: 10th World Filtration Congress, 2008, Leipzig-Germany. 10th World Filtration Congress, 2008.

- RUIZ, J.C., BLANC PH., PROUZET E., CORYN P., LAFFONT P., LARBOT A., Solid aerosol removal using ceramic filters, **Separation and Purification Technology**, vol.19, p. 221–227, 2000.
- SAHRAOURI, M. AND KAVIANY, M. Slip and No-Slip Boundary Condition at Interface of Porous, Plain Media, **Int J. Heat Mass Transfer**, vol. 35(4), p.927-943, 1992.
- SALVINI, V. R.; A. M., PUPIM; M. D. M., INNOCENTINI; V. C. PANDOLFELLI . Otimização do processamento para a fabricação de filtros no sistema SiC-Al₂O₃. **Cerâmica**, v. 47, p. 13-18, 2001.
- SALVINI, V. R., INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V. C. Correlação entre permeabilidade e resistência mecânica de filtros cerâmicos no sistema Al₂O₃ – SiC, **Ceramic News**, vol 7, n.1, 2000.
- SCHEIDEGGER, A. E., The Physics of Flow through Porous Media, 3 ed., University of Toronto Press, Toronto, Canadá, 1974.
- SCHIMIDT, E. Experimental investigations into the compression of dust cakes deposited on filter media. **Filtration and Separation**, vol.32 (8), sep. p.789-793, 1995.
- SEVILLE, J.P.K. Gas Cleaning in Demanding Applications, Blackie Academic & Professional, Glasgow, 1997.
- SONG, C. A., PARK, H. S., Analytic solutions for filtration of polydisperse aerosols in fibrous filter. **Powder Technology**, v.170, p. 64-70, 2006.
- SONG, C. A., PARK, H. S., LEE, K. W., Experimental study of filter clogging with monodisperse PSL particles. **Powder Technology**, v.163, p. 152-159, 2006.
- STEFFENS, J., COURY, J. R., Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles I: Homogeneous fibers. **Separation and purification technology**. vol. 58, p.99-105, 2007.

- STEFFENS, J., COURY, J. R., Collection efficiency of fiber filters operating on the removal of nano-sized aerosol particles II: Heterogeneous fibers. *Separation and purification technology*. vol. 58, p.106-112, 2007.
- TARDOS, G. I; PFEFFER, R., “Interceptional and gravitational deposition of inertialess particles on a single sphere in a granular bed”, **AICHE Journal**, vol. 26 (4), p.698-701, 1980.
- THAMBIMUTHU, K. V., Gas Cleaning for advanced coal-based power generation, IEA Coal Research, 1993.
- TIEN, C., Granular Filtration of Aerosol and Hydrosols, *Butterworths*, USA, 1989.
- TIENI, E.F., RODRIGUES, K.B., AGUIAR, M.L. Influence of cleaning velocity in the patchy cleaning behaviour. FILTECH, anais em CD-room, 2005.
- TOMADAKIS, M. M., ROBERTSON, T.J. Viscous Permeability of Random Fiber Structures: Comparison of Electrical and Diffusional Estimates with Experimental and Analytical Results. **Journal of Composite Material**, vol. 39(2), p.163- 187, 2005.
- VAN OSDELL, D. W.; LIU, B. Y. H.; RUBOW, K. L.; PUI, D. Y. H., Experimental study of submicrometer and ultrafine particle penetration and pressure drop for high efficiency filters”, **Aerosol Science and Tecnology**, vol. 12, p. 911-925, 1990.
- WALSH, D.C. Recent advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load. **Filtration and Separation**, v.33 n.06, 1996.
- WALSH, D.C., STENHOUSE, J.I.T, SCURRAH, K.L., GRAEF, A. The effect of solid and liquid aerosol particle loading on fibrous filter material performance. **Journal of Aerosol Science**, v.27, Suppl.1, p.S617-S618, 1996.
- WESTHUIZEN, J.V. DER, DU PLESSIS, J.P. An attempt to quantify fibre bed permeability utilizing the phase average Navier-Stokes equation. **Composites**. Part A vol. 27A p. 263-

269, 1996.

WILLEKE, K. e BARON, P.A., Aerosol measurement – Principles Techniques and Applications. Ed. K. Willeke e P.A. Baron, Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.

WITHERS, C.J., WEST, A.A., TWING, A.N., COUTNEY, R. S. SEVILLE, J.P., CLIFT, R. Improvements in the performance of ceramic media for filtration of hot gases, **Filtration and Separation**, January/February, p.32-37, 1990.

YONGCHENG, L., PARK C.W., Effective medium approximation and deposition of colloidal particles in fibrous and granular media. **Advances in Colloid and Interface Science**, vol. 87, p.1-74, 2000.

YOSHIDA, H.; TIEN, C., A new correlation of the initial collection efficiency of granular aerosol filtration, **AIChE J.** vol.31 (10) p.1752-1754, 1985.

ANEXO A

Preparação do Filtro de Microfibra de Quartzo para MEV e Análise no Image-Pro Plus.

PREPARAÇÃO DE AMOSTRA PARA MEV E ANÁLISE NO IMAGE-PRO PLUS

O desenvolvimento desta etapa do trabalho foi similar ao de Martins (2001) e consiste nos seguintes passos:

EMBUTIMENTO DO FILTRO

O filtro de fibra de quartzo virgem foi colocado sobre um recipiente redondo e adicionou-se uma resina embutidora até que o filtro estivesse totalmente encharcado. Em seguida o recipiente contendo o filtro foi colocado na estufa sem ventilação a uma temperatura de 60°C, por aproximadamente 96 horas, para “curar” a resina. A resina utilizada (PMS-10) possui baixa viscosidade, 7 a 10 cp, são anaeróbicas, de cor clara e não contém solventes. A resina foi fornecida pela LOCTITE do Brasil.

SECCIONAMENTO

Filtro endurecido foi cortado em pedaços de 1 cm² de área aproximadamente. A seguir estes pedaços foram embutidos em moldes cilíndricos de PVC, utilizando de outra resina, RESAPOL-208, deixando-o “curar” por 96 horas à temperatura ambiente. A impregnação com esta resina proporcionou resistência mecânica à amostra, visando atenuar a desestruturação nas etapas de esmerilamento e polimento.

ESMERILAMENTO

Esta etapa visou retirar os arranhões causados pelo seccionamento do filtro e desgastar a amostra. As amostras foram lixadas a úmido cuidadosamente, em lixas de carbetto de silício na seqüência de 240, 320, 400 e 600 mesh, por aproximadamente 10 min em cada lixa, dependendo da amostra.

POLIMENTO

O polimento retira todos os riscos deixados pelas lixas da etapa anterior, que podiam ser vistos em microscópico óptico. As amostras foram polidas, utilizando-se de uma politriz de baixa rotação. O tecido utilizado na politriz foi um veludo macio, impregnado com uma suspensão de alumina de 1µm. O tempo de duração desta operação variou de acordo com a amostra, ~ 30 min. Após análise em microscópico óptico verificava-se que a amostra estava

livre de ranhuras, a amostra foi submetida a um recobrimento metálico com ouro puro, utilizando um equipamento específico denominado “Sputtering”, do Laboratório de Preparação de Amostras do CCDM (UFSCar) (Figura A1).



Figura A1. Imagem das amostras do filtro de fibra de quartzo após tratamento.

APÊNDICE A

Dados de Permeabilidade do Filtro de Microfibra de Quartzo.

Tabela A.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro de microfibra de quartzo nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	Vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	Vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	Vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =21 °C)		(T =106,6 °C)		(T =200,6 °C)		(T =301,4 °C)	
0,003	7,00E+04	0,003	1,00E+05	0,004	1,58E+05	0,005	1,84E+05
0,004	1,10E+05	0,005	1,80E+05	0,006	1,90E+05	0,008	3,00E+05
0,006	1,40E+05	0,008	2,20E+05	0,010	2,40E+05	0,013	4,00E+05
0,009	1,80E+05	0,011	2,60E+05	0,014	3,20E+05	0,017	5,19E+05
0,014	2,40E+05	0,017	3,40E+05	0,022	4,79E+05	0,027	6,79E+05
0,019	3,10E+05	0,024	4,79E+05	0,030	6,59E+05	0,036	8,78E+05
0,024	3,80E+05	0,031	5,89E+05	0,038	8,38E+05	0,046	1,14E+06
0,029	4,79E+05	0,038	7,19E+05	0,047	9,97E+05	0,057	1,39E+06
0,035	5,59E+05	0,045	8,38E+05	0,056	1,22E+06	0,069	1,67E+06
0,042	6,59E+05	0,053	9,97E+05	0,066	1,39E+06	0,081	1,93E+06
0,048	7,58E+05	0,061	1,14E+06	0,076	1,55E+06	0,093	2,09E+06
0,055	8,38E+05	0,070	1,28E+06	0,087	1,75E+06	0,106	2,23E+06
0,061	9,18E+05	0,079	1,45E+06	0,097	1,89E+06	0,119	2,58E+06
0,068	1,04E+06	0,087	1,57E+06	0,108	2,09E+06	0,133	2,82E+06
0,075	1,14E+06	0,096	1,67E+06	0,120	2,19E+06	0,146	2,98E+06
0,082	1,22E+06	0,105	1,73E+06	0,131	2,38E+06	0,160	3,15E+06
0,089	1,35E+06	0,114	1,83E+06	0,142	2,54E+06	0,174	3,27E+06
0,097	1,41E+06	0,124	1,89E+06	0,154	2,62E+06	0,188	3,41E+06
0,104	1,49E+06	0,133	1,99E+06	0,165	2,78E+06	0,202	3,66E+06

Tabela A.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro de microfibras de quartzo nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	Vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	Vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	Vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =408,6 °C)		(T =500,5 °C)		(T =602,2 °C)		(T =702,7 °C)	
0,006	1,88E+05	0,007	2,20E+05	0,008	3,40E+05	0,009	3,40E+05
0,009	2,80E+05	0,010	4,00E+05	0,012	4,20E+05	0,013	4,79E+05
0,015	4,00E+05	0,017	5,39E+05	0,019	5,99E+05	0,021	5,99E+05
0,021	5,79E+05	0,023	6,79E+05	0,027	7,58E+05	0,030	8,38E+05
0,032	7,78E+05	0,036	9,38E+05	0,041	1,06E+06	0,045	1,18E+06
0,043	1,14E+06	0,048	1,26E+06	0,055	1,36E+06	0,061	1,57E+06
0,055	1,43E+06	0,062	1,57E+06	0,071	1,75E+06	0,078	1,93E+06
0,068	1,81E+06	0,077	1,93E+06	0,088	1,99E+06	0,097	2,19E+06
0,082	1,99E+06	0,092	2,19E+06	0,105	2,38E+06	0,116	2,58E+06
0,096	2,17E+06	0,108	2,48E+06	0,123	2,88E+06	0,137	2,98E+06
0,110	2,38E+06	0,125	2,78E+06	0,141	3,17E+06	0,157	3,57E+06
0,126	2,62E+06	0,143	3,27E+06	0,161	3,57E+06	0,179	3,96E+06
0,140	2,98E+06	0,160	3,57E+06	0,180	3,96E+06	0,201	4,35E+06
0,156	3,21E+06	0,178	3,96E+06	0,200	4,35E+06	0,223	4,64E+06
0,171	3,57E+06	0,197	4,15E+06	0,220	4,64E+06	0,246	4,93E+06
0,186	3,96E+06	0,215	4,45E+06	0,240	4,93E+06	0,269	5,32E+06
0,202	4,15E+06	0,234	4,72E+06	0,260	5,13E+06	0,291	5,71E+06
0,219	4,35E+06	0,253	4,93E+06	0,281	5,32E+06	0,315	6,10E+06
0,235	4,54E+06	0,272	5,17E+06	0,301	5,71E+06	0,338	6,39E+06

Tabela A.2. Dados da constante de permeabilidade Darciana para o filtro de microfibras de quartzo.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana ($k_1, 10^{-12} \text{ m}^2$)
21,0	1,2266
102,6	1,3316
195,0	1,4455
301,4	1,5069
408,6	1,6193
500,5	1,7519
602,2	1,9199
702,7	2,0855

Tabela A.3. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro de microfibras de quartzo.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
21,0	1,0000	1,0000
102,6	1,0855	1,2065
195,0	1,1784	1,4184
301,4	1,2285	1,6304
408,6	1,3201	1,8315
500,5	1,4281	1,9837
602,2	1,5652	2,1467
702,7	1,7001	2,2989

APÊNDICE B

**Dados de Permeabilidade dos Filtros Cerâmicos Fibrosos
B750, B1000 e A1000.**

Tabela B.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso B750 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =17,5 °C)		(T =109,6 °C)		(T =212,3 °C)		(T =313,8 °C)	
0,0252	881,958	0,0332	881,958	0,0422	881,958	0,0510	1175,925
0,0399	1665,85	0,0526	1469,883	0,0667	1469,883	0,0807	1959,793
0,0561	2155,75	0,0740	2547,65	0,0939	2645,622	0,1136	3429,365
0,0831	3821,213	0,1096	4310,997	0,139	4800,756	0,1681	5486,375
0,1019	4996,654	0,1344	4898,705	0,1705	6465,743	0,2061	6367,811
0,1314	6465,747	0,1733	6367,811	0,2198	7347,086	0,2656	9305,326
0,1515	7347,09	0,1997	7836,685	0,2533	8815,805	0,3061	10773,735
0,1817	8326,263	0,2395	9794,821	0,3038	10773,735	0,3672	13709,854
0,202	10284,299	0,2663	10773,735	0,3377	13220,565	0,4081	15666,751
0,2327	10969,514	0,3067	13220,565	0,389	15177,566	0,4701	18601,323
0,253	13220,579	0,3335	15177,566	0,4229	17623,235	0,511	21534,967
0,2844	15177,583	0,3749	17623,235	0,4754	20557,189	0,5744	24956,381
0,3047	16645,066	0,4016	19579,307	0,5092	22512,643	0,6153	27888,019
0,335	19090,356	0,4416	23001,442	0,5599	26422,316	0,6764	33260,287
0,3553	21046,125	0,4682	24956,381	0,5937	28376,535	0,7172	35213,069
0,3831	23001,483	0,5049	27888,019	0,6402	31307,094	0,7732	40093,232
0,4033	24956,429	0,5315	29841,93	0,6739	34236,729	0,8137	44970,836
0,4336	27888,079	0,5714	33260,287	0,7244	38629,452	0,8749	46921,162
0,4538	29353,557	0,598	35213,069	0,7581	41556,782	0,9155	50820,589
0,4841	32772,11	0,6379	38629,452	0,8085	45946,05	0,9762	57640,661
0,5042	34725,005	0,6644	40581,107	0,8421	48871,08	1,017	62509,088
0,5345	37653,58	0,7042	44970,836	0,8924	54231,249	1,077	67374,974

Tabela B.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso B750 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 419,3 °C)		(T = 496,0 °C)		(T = 607,2 °C)		(T = 707,6 °C)	
0,0601	1273,912	0,0668	1665,85	0,0765	1567,867	0,0852	1567,867
0,0952	2547,65	0,1058	2547,65	0,1211	3233,436	0,1349	3331,401
0,134	3821,212	0,1489	4310,997	0,1704	5290,489	0,1898	5780,197
0,1983	6074,009	0,2202	6759,534	0,252	8619,989	0,2808	8326,258
0,2431	7347,086	0,27	8815,805	0,309	10284,291	0,3442	11752,544
0,3133	10773,735	0,348	11752,544	0,3982	13709,854	0,4436	15177,566
0,3611	12731,251	0,4011	13709,854	0,4589	16155,911	0,5111	18601,323
0,4331	15177,566	0,481	16645,045	0,5503	21046,091	0,6128	23978,963
0,4814	18112,292	0,5347	19579,307	0,6117	23978,963	0,6812	27399,477
0,5545	21534,967	0,6158	23490,215	0,7044	28865,026	0,7843	33748,521
0,6027	24467,685	0,6693	27399,477	0,7655	33260,287	0,8524	38141,474
0,6775	27399,477	0,7522	32283,742	0,8604	38629,452	0,9577	45946,05
0,7256	31307,094	0,8057	35213,069	0,9213	43995,52	1,026	50820,589
0,7978	36189,307	0,8857	41068,957	1,013	51795,191	1,127	60562,022
0,8459	39117,404	0,9388	45946,05	1,073	56666,671	1,194	67374,974
0,9118	43995,52	1,012	49845,886	1,157	64455,747	1,287	79042,762
0,9596	49845,886	1,065	58614,55	1,217	74182,955	1,354	84871,195
1,031	54718,385	1,145	63482,468	1,308	78071,003	1,455	92636,792
1,079	59588,337	1,198	67374,974	1,368	87784,049	1,522	97487,018
1,151	64455,747	1,277	75155,119	1,459	92636,792	1,622	107179,941
1,198	69320,619	1,329	80985,977	1,519	97487,018	1,689	116862,85
1,27	77099,143	1,409	86813,199	1,609	107179,941	1,788	131368,504

Tabela B.2. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso B1000 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =14 °C)		(T =107,16 °C)		(T =201,86 °C)		(T =326,77 °C)	
0,0248	587,981	0,0330	783,967	0,0412	1077,937	0,0521	1371,898
0,0393	1273,913	0,0523	1469,883	0,0653	2351,701	0,0825	2253,726
0,0554	2253,727	0,0736	2841,564	0,0919	3625,291	0,1161	3919,171
0,0820	3723,254	0,1089	4996,652	0,136	5878,135	0,1718	6269,878
0,1006	5094,603	0,1336	4898,705	0,1668	6857,462	0,2106	8326,258
0,1296	7249,172	0,1721	7836,685	0,215	8815,805	0,2715	10773,735
0,1494	7836,694	0,1984	9305,326	0,2478	11752,544	0,3129	13220,565
0,1792	9305,339	0,238	11263,152	0,2972	13709,854	0,3752	15177,566
0,1992	10773,753	0,2645	13220,565	0,3303	16155,911	0,4171	18601,323
0,2295	12731,276	0,3047	15177,566	0,3805	18601,323	0,4804	22023,818
0,2495	14688,388	0,3313	17623,235	0,4136	21534,967	0,5221	25445,052
0,2805	17134,198	0,3724	20557,189	0,4649	24467,685	0,5869	29353,491
0,3005	18601,376	0,3989	22512,643	0,498	27399,477	0,6285	33260,287
0,3304	21046,159	0,4387	25445,052	0,5476	31307,094	0,691	38141,474
0,3504	23001,524	0,4651	28376,535	0,5806	34236,729	0,7326	42044,58
0,3778	25445,152	0,5015	31795,431	0,6259	38141,474	0,7898	46921,162
0,3977	27399,593	0,5279	34236,729	0,6588	42044,58	0,8313	50820,589
0,4276	29842,068	0,5675	38141,474	0,7082	45946,05	0,8933	57640,661
0,4476	31795,587	0,5939	41068,957	0,741	49845,886	0,9346	62509,088
0,4774	34725,098	0,6334	44483,191	0,7902	55692,579	0,9967	68347,847
0,4973	37165,655	0,6598	47408,68	0,823	59588,337	1,038	73210,691
0,5271	40581,361	0,6991	52769,691	0,8721	65428,924	1,1	80014,42

Tabela B.2. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso B1000 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 422,45 °C)		(T = 524,14 °C)		(T = 615,8 °C)		(T = 714,57 °C)	
0,06045	1861,813	0,06929	1861,813	0,07725	2645,622	0,08583	3135,469
0,09567	2645,622	0,1096	3527,328	0,1222	3821,212	0,1358	4213,042
0,1346	4310,997	0,1543	5094,599	0,172	6367,811	0,1911	7347,086
0,1992	7347,086	0,2282	8815,805	0,2544	10773,735	0,2828	8326,258
0,2442	9794,821	0,2798	10773,735	0,3119	13709,854	0,3464	16645,045
0,3147	12731,251	0,3606	15177,566	0,4019	19090,328	0,4464	22512,643
0,3627	15177,566	0,4156	17623,235	0,4631	22512,643	0,5142	28376,535
0,4349	18601,323	0,4983	22512,643	0,5553	27888,019	0,6165	35213,069
0,4834	22023,818	0,5538	26910,909	0,617	33748,521	0,685	41068,957
0,5567	26910,909	0,6376	33260,287	0,7103	41068,957	0,7884	50820,589
0,6051	30330,344	0,6929	39117,404	0,7719	46433,619	0,8564	60075,192
0,6801	35213,069	0,7787	44970,836	0,8672	55692,579	0,9617	73210,691
0,7283	39117,404	0,8337	50820,589	0,9283	63482,468	1,03	78071,003
0,8005	46921,162	0,9164	58614,55	1,021	68347,847	1,131	92636,792
0,8486	51795,191	0,9714	63482,468	1,081	78071,003	1,198	107179,941
0,9147	57640,661	1,047	68347,847	1,165	87784,049	1,29	121700,559
0,9625	63482,468	1,102	73210,691	1,226	97487,018	1,355	141026,513
1,034	70293,289	1,184	82928,788	1,316	112022,646	1,455	160312,847
1,082	77099,143	1,238	92636,792	1,376	121700,559	1,519	179559,806
1,154	82928,788	1,32	102334,734	1,467	131368,504	1,616	208356,951
1,201	87784,049	1,374	112022,646	1,526	145851,802	1,679	237066,871
1,273	97487,018	1,455	121700,559	1,615	165128,269	1,774	270452,61

Tabela B.3. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso A1000 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =14 °C)		(T =100,66 °C)		(T =219,55 °C)		(T =314,75 °C)	
0,02503	979,948	0,03258	587,981	0,04294	1371,898	0,05124	1371,898
0,03961	1469,883	0,05156	1763,832	0,06796	2057,771	0,08109	2253,725
0,05576	1665,85	0,07257	2743,593	0,09566	2645,621	0,11441	3135,468
0,08248	3331,399	0,1074	3821,21	0,1415	4115,083	0,1688	4996,648
0,1011	4115,083	0,1317	4310,994	0,1735	5290,485	0,207	6465,737
0,1304	5682,252	0,1697	5878,13	0,2237	6857,454	0,2668	8815,793
0,1503	6074,003	0,1956	7053,307	0,2578	8815,793	0,3076	9794,806
0,1803	7836,675	0,2347	8326,247	0,3092	10773,716	0,3689	11752,523
0,2004	8913,699	0,2609	9305,313	0,3437	12731,226	0,4101	13709,825
0,2309	9599,012	0,3006	10675,83	0,396	14688,321	0,4724	16645,002
0,251	10284,274	0,3268	11654,647	0,4305	16645,002	0,5135	19090,271
0,2823	11654,647	0,3674	12731,226	0,4839	19579,248	0,5772	22512,564
0,3024	12633,36	0,3936	14199,086	0,5183	21534,895	0,6182	25444,951
0,3326	13905,532	0,4329	15666,713	0,5699	25444,951	0,6798	29353,357
0,3527	14688,321	0,459	17134,107	0,6043	28376,41	0,7207	33260,115
0,3804	16155,87	0,495	19579,248	0,6515	32283,58	0,777	37165,227
0,4005	17623,187	0,5211	21437,123	0,6858	35212,877	0,8179	40092,983
0,4306	19579,248	0,5603	23685,63	0,7373	38141,248	0,8792	43995,22
0,4507	21046,022	0,5864	25444,951	0,7716	41068,696	0,92	47895,816
0,4808	23001,36	0,6254	29353,357	0,8229	45945,723	0,9809	54717,921
0,5008	24467,592	0,6515	31795,274	0,8571	48870,71	1,022	58614,018
0,5309	27399,36	0,6905	35212,877	0,9084	52769,259	1,083	63481,845

Tabela B.3. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso A1000 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 406,43 °C)		(T = 500,66 °C)		(T = 608,61 °C)		(T = 700,66 °C)	
0,05922	2939,532	0,06734	2645,622	0,07674	1959,792	0,08474	2743,593
0,09374	2155,748	0,1066	3331,4	0,1214	3331,4	0,1341	4408,949
0,1319	3233,434	0,15	5094,597	0,1709	5388,43	0,1887	7249,159
0,1952	6171,938	0,2218	7934,597	0,2528	7836,68	0,2791	9794,814
0,2393	7249,155	0,272	9794,814	0,3099	10773,726	0,3422	12241,899
0,3084	9794,806	0,3506	12731,238	0,3994	14688,338	0,4409	17623,211
0,3555	11752,523	0,4041	14688,338	0,4603	16645,023	0,5082	20557,156
0,4264	13709,825	0,4845	18601,296	0,552	21046,057	0,6092	27399,419
0,474	15666,713	0,5386	21534,931	0,6135	24467,638	0,677	31307,018
0,5459	19579,248	0,6202	25933,644	0,7065	29353,424	0,7795	38141,361
0,5934	21534,895	0,6742	29353,424	0,7678	33748,433	0,8472	43019,958
0,667	25444,951	0,7576	35212,973	0,8629	39117,286	0,9518	50820,389
0,7144	28376,41	0,8113	40093,107	0,924	44970,679	1,019	58614,285
0,7855	33260,115	0,8919	45945,887	1,016	52769,475	1,12	67374,624
0,8326	38141,248	0,9455	49845,693	1,076	60561,739	1,187	74182,531
0,8975	43995,22	1,019	56666,423	1,16	68347,486	1,279	83899,499
0,9447	46920,821	1,072	62508,786	1,22	74182,531	1,346	89724,828
1,015	51794,775	1,152	72237,922	1,311	83899,499	1,445	102333,928
1,062	56666,174	1,205	77098,684	1,372	89724,828	1,512	109116,408
1,133	62508,483	1,285	83899,499	1,462	97486,287	1,611	121699,422
1,18	66401,318	1,338	89724,828	1,522	107179,058	1,677	128467,899
1,251	70292,525	1,417	99425,645	1,612	118797,149	1,775	144885,335

Tabela B.4. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso B750.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-5} (m)$
17,5	4,864	1,600
109,6	7,424	1,537
212,3	10,605	1,530
313,8	12,883	1,317
419,3	15,564	1,277
496,0	15,548	1,308
607,2	16,730	1,109
707,6	31,646	0,821

Tabela B.5. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso B1000.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-5} (m)$
14,00	3,379	1,128
107,16	5,236	1,198
201,86	10,708	1,022
326,77	15,511	0,880
422,45	15,090	0,687
524,14	16,375	0,680
615,80	21,360	0,604
714,57	21,645	0,285

Tabela B.6. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso A1000.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-5} (m)$
14,00	4,947	2,752
100,66	8,263	2,022
219,55	11,325	1,644
314,75	16,116	1,504
406,43	17,114	1,522
500,66	18,733	1,253
608,61	20,198	1,091
700,66	18,518	0,973

Tabela B.7. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso B750.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
17,5	1	1
109,6	1,5262	1,2349
212,3	2,1800	1,4699
313,8	2,6484	1,6612
419,3	3,1995	1,8579
496,0	3,1961	2,0163
607,2	3,4391	2,1748
707,6	6,5053	2,3278

Tabela B.8. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso B1000.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
14,00	1	1
107,16	1,54943	1,2277
201,86	3,16867	1,4944
326,77	4,58981	1,7000
422,45	4,46506	1,8611
524,14	4,84522	2,0333
615,80	6,32024	2,2055
714,57	6,40457	2,3611

Tabela B.9. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso A1000.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
14,00	1	1
100,66	1,67	1,2444
219,55	2,29	1,5000
314,75	3,26	1,7166
406,43	3,46	1,8833
500,66	3,79	2,0444
608,61	4,08	2,2111
700,66	3,74	2,3666

APÊNDICE C

Dados de Permeabilidade dos Filtros Cerâmicos Fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.

Tabela C.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 1A nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =23,5 °C)		(T =107,3 °C)		(T =206,25 °C)		(T =310,11 °C)	
0,026	7980,247	0,033	5985,866	0,042	7980,091	0,051	8976,512
0,041	11967,847	0,053	9475,841	0,066	12465,586	0,081	15952,485
0,058	15953,804	0,074	15455,548	0,093	18940,803	0,114	21926,898
0,086	23920,526	0,110	27403,214	0,138	30385,560	0,168	35852,693
0,105	29891,127	0,134	34365,554	0,169	36848,694	0,206	44792,201
0,135	38839,853	0,173	43805,255	0,218	49261,256	0,265	64137,741
0,156	44800,973	0,199	50755,092	0,251	57198,451	0,305	73541,310
0,186	53239,356	0,239	60674,772	0,301	69585,219	0,365	87387,341
0,207	59191,469	0,265	66126,152	0,334	76518,482	0,405	96774,502
0,238	71084,075	0,305	75040,589	0,384	87397,464	0,466	109613,086
0,259	78509,479	0,332	84437,043	0,418	93329,704	0,506	124386,442
0,291	86917,725	0,372	94814,126	0,469	109118,848	0,568	139647,932
0,312	91860,428	0,399	100247,058	0,502	117496,884	0,608	152902,500
0,342	106672,296	0,438	108633,849	0,551	127347,695	0,668	171538,225
0,363	114069,565	0,464	116519,271	0,584	141106,658	0,707	187194,001
0,391	123924,255	0,500	128827,628	0,629	155350,200	0,761	207231,775
0,411	129831,887	0,526	136695,389	0,662	162219,451	0,800	219435,614
0,442	141635,951	0,565	146033,871	0,710	176913,679	0,859	235989,551
0,462	149988,640	0,591	153394,735	0,743	185721,562	0,898	253001,680
0,492	160296,219	0,630	169572,439	0,791	202332,472	0,955	275300,114
0,512	171082,549	0,656	176913,679	0,824	211606,368	0,994	287420,335
0,543	182346,409	0,695	187684,713	0,872	225725,744	1,052	305795,933

Tabela C.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 1A nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 408 °C)		(T = 506,48 °C)		(T = 608,10 °C)		(T = 719 ,34 °C)	
0,060	10472,110	0,068	13961,080	0,077	15953,613	0,087	19440,095
0,094	16451,296	0,108	23920,518	0,122	31383,247	0,137	41324,185
0,132	26903,775	0,152	33371,666	0,171	45794,347	0,192	62662,052
0,196	42808,208	0,224	55719,348	0,252	79004,514	0,283	101244,785
0,240	55709,946	0,274	74549,222	0,309	99762,381	0,347	125895,107
0,308	76511,745	0,352	100256,361	0,397	126380,756	0,445	163241,111
0,355	86396,675	0,405	112589,862	0,456	149985,808	0,512	186753,105
0,425	104669,011	0,485	138191,679	0,545	182830,058	0,611	229221,590
0,472	115027,459	0,538	154405,308	0,605	203365,267	0,678	251114,506
0,543	133244,605	0,618	181854,611	0,695	234566,709	0,778	288460,356
0,589	148471,283	0,671	200438,531	0,753	259840,075	0,843	318427,041
0,661	171507,996	0,752	227749,178	0,844	291827,254	0,944	356475,677
0,707	182777,100	0,804	243812,068	0,903	311168,241	1,009	381919,583
0,776	204747,517	0,883	268583,481	0,990	343949,281	1,106	419723,020
0,822	221812,577	0,935	282160,737	1,047	366547,871	1,170	443097,559
0,884	247108,122	1,005	309730,311	1,125	400102,462	1,256	487783,473
0,930	256826,622	1,056	328063,837	1,182	423046,306	1,319	508157,385
0,998	273310,847	1,133	357429,769	1,266	461631,209	1,412	553965,749
1,043	290739,481	1,184	372795,834	1,322	484900,509	1,474	580315,959
1,111	311023,703	1,259	400113,595	1,406	514764,551	1,566	618775,040
1,155	325986,926	1,310	415886,600	1,461	539796,323	1,626	651023,708
1,222	350039,691	1,385	442606,237	1,543	576506,303	1,717	689213,748

Tabela C.2. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 2D nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =23,3 °C)		(T =104,18 °C)		(T =219,66 °C)		(T =308, 98 °C)	
0,024	5092,20	0,033	5092,20	0,043	6110,31	0,051	7128,32
0,038	9164,01	0,052	10181,69	0,068	10181,69	0,081	11708,01
0,054	13234,08	0,073	13234,08	0,096	17302,43	0,113	19335,95
0,080	20352,56	0,109	22385,43	0,142	28481,48	0,167	33558,56
0,098	28481,48	0,133	32543,36	0,174	36603,52	0,205	43704,67
0,126	39647,51	0,171	41676,31	0,224	55865,87	0,264	61940,70
0,145	48773,71	0,197	52827,01	0,257	68011,71	0,304	76100,43
0,173	61940,70	0,236	69023,17	0,308	88220,79	0,363	100325,96
0,193	72056,92	0,263	79131,95	0,342	101334,03	0,404	111409,04
0,221	87211,35	0,302	95283,98	0,393	121473,57	0,464	131527,65
0,241	95283,98	0,328	111409,04	0,427	146589,24	0,504	151604,59
0,270	111409,04	0,368	126501,91	0,479	161627,51	0,564	186639,75
0,289	121473,57	0,394	141571,31	0,512	181642,44	0,604	201616,35
0,318	136550,78	0,432	166635,10	0,562	211588,00	0,661	241442,13
0,336	151604,59	0,458	181642,44	0,594	241442,13	0,700	261294,52
0,362	171640,12	0,492	211588,00	0,639	261294,52	0,751	310751,00
0,381	181642,44	0,517	221549,49	0,671	290998,16	0,788	340306,47
0,409	201616,35	0,555	251373,34	0,719	330464,44	0,844	379577,32
0,427	221549,49	0,579	271205,69	0,751	350138,74	0,882	399154,80
0,454	246408,99	0,616	300879,52	0,798	389370,86	0,936	447931,40
0,472	266251,35	0,641	320612,63	0,829	418693,97	0,972	481934,49
0,499	290998,16	0,677	350138,74	0,875	457658,30	1,025	535137,40

Tabela C.2. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 2D nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 413,95 °C)		(T = 525,16 °C)		(T = 616,7 °C)		(T = 713,41 °C)	
0,060	9164,01	0,070	13234,08	0,078	11199,26	0,086	14251,33
0,095	14251,33	0,110	20352,56	0,123	20352,56	0,136	22385,43
0,134	21369,05	0,155	30512,63	0,173	34573,65	0,192	35588,64
0,198	36603,52	0,229	50800,57	0,255	56878,61	0,283	61940,70
0,242	46746,41	0,281	68011,71	0,312	78121,55	0,346	83172,49
0,311	65988,46	0,361	93266,46	0,402	101334,03	0,445	111409,04
0,358	84182,36	0,415	111409,04	0,462	121473,57	0,512	131527,65
0,429	101334,03	0,496	141571,31	0,553	151604,59	0,612	171640,12
0,476	121473,57	0,550	171640,12	0,613	181642,44	0,677	211588,00
0,547	151604,59	0,631	211588,00	0,702	231500,86	0,777	251373,34
0,593	171640,12	0,684	241442,13	0,761	261294,52	0,840	300879,52
0,664	211588,00	0,764	310751,00	0,852	310751,00	0,939	359961,29
0,710	231500,86	0,815	350138,74	0,908	359961,29	1,002	399154,80
0,777	281106,90	0,892	399154,80	0,993	408929,16	1,096	457658,30
0,822	310751,00	0,941	447931,40	1,048	457658,30	1,155	515823,26
0,882	359961,29	1,010	496472,17	1,125	506152,35	1,236	592860,43
0,925	399154,80	1,059	535137,40	1,176	573655,76	1,293	650258,94
0,990	447931,40	1,132	592860,43	1,255	650258,94	1,381	716821,44
1,032	486782,71	1,179	640714,81	1,307	697847,32	1,438	773536,49
1,095	535137,40	1,250	707338,73	1,384	773536,49	1,522	848680,46
1,137	573655,76	1,295	764105,43	1,434	820564,55	1,578	895374,22
1,198	631161,80	1,365	820564,55	1,509	895374,22	1,659	978908,37

Tabela C.3. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 3D nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =27 °C)		(T =109,59 °C)		(T =203,93 °C)		(T =304,55 °C)	
0,026	10419,98	0,034	9899,24	0,042	11461,36	0,051	11461,36
0,042	15625,80	0,053	13543,80	0,066	12502,64	0,080	17707,36
0,059	19788,47	0,075	19788,47	0,093	13543,80	0,112	41613,50
0,086	31226,69	0,110	56136,58	0,137	58209,56	0,166	70638,24
0,106	36421,47	0,135	72708,16	0,168	74777,64	0,203	89251,88
0,137	44727,40	0,173	90284,94	0,216	95448,62	0,261	114015,54
0,157	95448,62	0,200	98545,53	0,248	114015,54	0,300	126374,13
0,188	108861,56	0,239	119166,83	0,297	134604,63	0,359	155151,02
0,208	124315,44	0,265	134604,63	0,330	155151,02	0,398	185891,13
0,239	144883,15	0,305	155151,02	0,379	175654,98	0,458	211435,60
0,260	165408,29	0,331	175654,98	0,412	196116,77	0,497	226730,97
0,292	185891,13	0,371	206331,94	0,461	226730,97	0,556	277547,51
0,312	201225,66	0,397	216536,66	0,493	247088,49	0,594	302859,74
0,342	226730,97	0,436	242002,99	0,541	277547,51	0,650	348262,41
0,363	236914,90	0,461	257251,77	0,572	302859,74	0,688	378418,21
0,390	262329,55	0,496	287680,03	0,615	333150,82	0,740	408484,85
0,410	282615,04	0,521	307914,57	0,646	358324,30	0,775	453419,45
0,440	307914,57	0,559	338190,52	0,692	398472,50	0,831	488232,92
0,459	323063,88	0,584	358324,30	0,723	418487,40	0,867	517979,60
0,489	348262,41	0,622	378418,21	0,769	458400,03	0,920	567367,98
0,509	366366,63	0,646	403479,90	0,800	473327,30	0,955	606710,25
0,537	398472,50	0,683	428480,16	0,845	508073,57	1,007	655680,48

Tabela C.3. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 3D nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 417,59 °C)		(T = 522,45 °C)		(T = 621,36 °C)		(T = 709,91 °C)	
0,060	22389,28	0,069	28108,56	0,078	36421,57	0,086	42651,57
0,095	35382,82	0,110	46802,94	0,123	59246,14	0,136	67532,54
0,134	54063,39	0,154	67532,88	0,173	85119,08	0,190	90284,94
0,198	87185,99	0,227	103705,68	0,255	136662,55	0,280	148991,57
0,242	114016,49	0,278	134605,96	0,311	172584,25	0,342	191005,26
0,311	144884,68	0,357	175657,23	0,399	231828,12	0,438	251155,04
0,357	165410,28	0,410	206335,03	0,458	264364,98	0,502	295778,72
0,427	206335,03	0,489	257256,55	0,546	329125,02	0,600	347255,67
0,473	236918,97	0,542	287685,99	0,605	363360,94	0,663	399474,17
0,542	297808,76	0,620	358333,48	0,697	364366,13	0,759	463378,20
0,587	328116,33	0,672	388461,04	0,752	438476,80	0,821	520949,56
0,658	358333,48	0,752	438476,80	0,842	478314,39	0,915	606710,25
0,702	408496,72	0,802	478314,39	0,894	566404,95	0,975	655680,48
0,766	488249,73	0,876	557530,87	0,980	606735,88	1,063	743255,95
0,809	527895,71	0,923	616549,10	1,032	675236,21	1,119	815686,61
0,866	596913,44	0,989	684985,62	1,106	733598,11	1,195	916273,20
0,906	655710,27	1,035	743293,88	1,154	826315,00	1,250	975230,42
0,970	704457,45	1,105	810918,00	1,234	878117,44	1,330	1,09E6
1,009	762658,90	1,151	858960,43	1,281	963906,58	1,383	1,15E6
1,070	830160,79	1,221	916329,79	1,359	1,02E6	1,464	1,23E6
1,110	868543,19	1,263	992353,21	1,404	1,11E6	1,516	1,29E6
1,171	916329,79	1,333	1,04E6	1,463	1,27E6	1,589	1,4E6

Tabela C.4. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 5A nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 22,5 °C)		(T = 112,5 °C)		(T = 207,86 °C)		(T = 312,52 °C)	
0,026	29256,97	0,034	30567,93	0,042	27079,10	0,051	29694,53
0,041	47979,10	0,053	47984,08	0,066	48413,40	0,081	53190,60
0,057	74037,99	0,075	68834,73	0,093	72297,11	0,113	80961,86
0,084	126748,97	0,110	120715,94	0,137	121557,76	0,167	115540,51
0,103	162857,80	0,134	154279,79	0,168	150821,75	0,204	162762,70
0,131	216725,57	0,172	205224,29	0,214	220451,81	0,260	236983,63
0,151	251172,04	0,197	241402,67	0,246	254372,51	0,299	276357,59
0,180	320077,56	0,235	302784,43	0,293	308066,80	0,355	341658,77
0,199	366219,04	0,260	347766,72	0,324	361743,51	0,392	407437,08
0,227	445747,65	0,297	421695,26	0,369	442462,07	0,447	481142,52
0,245	494979,79	0,321	472269,73	0,399	500994,73	0,482	552256,47
0,272	591793,33	0,357	560247,11	0,443	604698,84	0,536	657382,24
0,290	640178,49	0,379	631387,84	0,471	663043,31	0,568	738571,82
0,315	728166,78	0,412	722371,16	0,512	765252,57	0,615	876665,14
0,332	793734,33	0,433	797844,52	0,538	835547,86	0,644	982008,26

Tabela C.4. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico fibroso 5A nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 415,68 °C)		(T = 511,4 °C)		(T = 603,32 °C)		(T = 703,07 °C)	
0,060	34050,54	0,068	41542,72	0,076	53374,24	0,081	71092,02
0,095	57979,18	0,108	71092,02	0,120	100531,98	0,127	129872,23
0,133	89197,29	0,151	112279,76	0,168	141578,62	0,177	182420,25
0,196	142255,86	0,221	199736,96	0,246	240426,09	0,258	320972,21
0,239	188098,97	0,268	292170,10	0,299	309512,19	0,314	400750,91
0,305	256256,74	0,342	372233,46	0,380	429087,95	0,397	569305,47
0,349	316194,98	0,392	429020,37	0,433	513495,54	0,451	701746,17
0,414	413293,62	0,461	591256,11	0,510	668925,57	0,533	843309,57
0,457	479993,72	0,506	701503,94	0,558	800036,22	0,580	1,04E6
0,518	610811,07	0,573	848310,65	0,633	929290,58	0,656	1,23E6
0,558	679690,62	0,612	992579,92	0,673	1,13E6	0,695	1,43E6
0,618	809383,58	0,675	1,16E6	0,739	1,32E6	0,762	1,7E6
0,654	915909,97	0,703	1,38E6	0,773	1,52E6	0,795	1,97E6
0,704	1,09E6	0,758	1,55E6	0,824	1,78E6	0,840	2,35E6
0,737	1,2E6	0,791	1,68E6	0,854	1,98E6	0,870	2,58E6

Tabela C.5. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso 1A.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-6} (m)$
23,5	0,701	1,740
107,1	0,975	1,589
206,3	1,340	1,217
310,1	1,624	1,390
408,0	1,615	1,233
506,5	1,377	1,146
608,1	1,300	1,091
719,3	1,230	1,115

Tabela C.6. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso 2D.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-6} (m)$
23,3	0,803	8,651
104,2	1,422	9,917
219,7	1,726	8,877
309,0	2,754	8,267
413,9	3,556	9,607
525,2	3,845	9,902
616,7	4,140	9,060
713,4	3,786	9,573

Tabela C.7. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso 3D.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-6} (m)$
25,6	0,312	4,983
110,5	0,611	2,624
209,0	0,817	1,816
310,1	1,037	1,488
417,6	0,810	1,470
522,5	1,153	1,102
621,4	1,319	1,100
709,9	1,497	0,755

Tabela C.8. Dados das constantes de permeabilidade Darciana e não-Darciana para o filtro cerâmico fibroso 5A.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-10} (m^2)$	$k_2 \cdot 10^{-6} (m)$
22,5	0,171	0,284
112,5	0,330	0,335
207,9	0,405	0,295
312,5	0,666	0,240
415,7	1,559	0,308
511,4	4,172	0,164
603,3	5,360	0,154
703,1	6,015	0,107

Tabela C.9. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso 1A.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
23,5	1,00	1,000
107,1	1,39	1,211
206,3	1,91	1,432
310,1	2,32	1,649
408,0	2,30	1,822
506,5	1,96	1,984
608,1	1,85	2,146
719,3	1,75	2,303

Tabela C.10. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso 2D.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
23,3	1,00	1,000
104,2	1,77	1,205
219,7	2,15	1,459
309,0	3,43	1,638
413,9	4,43	1,832
525,2	4,79	2,016
616,7	5,15	2,157
713,4	4,71	2,303

Tabela C.11. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso 3D.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
25,6	1,00	1,000
110,5	1,96	1,210
209,0	2,62	1,430
310,1	3,32	1,634
417,6	2,60	1,828
522,5	3,69	2,000
621,4	4,23	2,156
709,9	4,80	2,285

Tabela C.12. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico fibroso 5A.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
22,5	1,00	1,000
112,5	1,93	1,245
207,9	2,37	1,446
312,5	3,90	1,663
415,7	9,14	1,853
511,4	24,50	2,000
603,3	31,40	2,152
703,1	35,30	2,299

APÊNDICE D

Dados de Permeabilidade dos Filtros Cerâmicos Celulares A12 e A13.

Tabela D.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico celular A12 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =15,5 °C)		(T =92,2 °C)		(T =198 °C)		(T =293,9 °C)	
0,004	42300	0,005	48100	0,002	22300	0,003	30500
0,009	73900	0,011	85500	0,006	65700	0,007	71500
0,013	108000	0,017	105000	0,014	104000	0,017	117000
0,021	134000	0,026	140000	0,018	117000	0,026	152000
0,026	181000	0,033	187000	0,021	134000	0,035	210000
0,034	244000	0,043	267000	0,029	187000	0,045	239000
0,040	279000	0,051	325000	0,033	210000	0,055	325000
0,049	347000	0,062	393000	0,042	256000	0,061	359000
0,055	382000	0,07	449000	0,055	347000	0,067	393000
0,065	461000	0,078	495000	0,065	416000	0,072	461000
0,071	483000	0,082	551000	0,08	506000	0,078	506000
0,081	551000	0,09	629000	0,089	573000	0,084	528000
0,087	573000	0,102	673000	0,1	618000	0,09	562000
0,097	640000	0,109	761000	0,106	662000	0,096	584000
0,103	728000	0,118	794000	0,116	717000	0,102	618000
0,113	838000	0,121	838000	0,131	827000	0,114	695000
0,119	882000	0,129	871000	0,135	903000	0,125	794000
0,128	969000	0,141	968000	0,14	947000	0,137	871000
0,138	1E6	0,149	1,02E6	0,149	1,07E6	0,149	903000
0,144	1E6	0,16	1,11E6	0,159	1,11E6	0,153	1,04E6
						0,164	1,11E6

Tabela D.1. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico celular A12 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 383,8 °C)		(T = 482,5 °C)		(T = 587,2 °C)		(T = 696,2 °C)	
0,006	57500	0,007	52800	0,005	36400	0,005	39900
0,014	105000	0,017	101000	0,008	61000	0,009	66900
0,025	152000	0,029	152000	0,019	129000	0,021	117000
0,035	210000	0,041	210000	0,033	163000	0,037	169000
0,046	279000	0,053	302000	0,046	221000	0,052	227000
0,052	302000	0,06	325000	0,061	313000	0,068	325000
0,058	347000	0,067	381000	0,068	370000	0,076	370000
0,064	381000	0,073	427000	0,076	416000	0,085	416000
0,07	416000	0,08	461000	0,084	438000	0,093	461000
0,076	461000	0,087	495000	0,092	461000	0,102	495000
0,082	495000	0,095	528000	0,101	506000	0,111	551000
0,089	517000	0,102	573000	0,109	562000	0,121	584000
0,095	573000	0,11	606000	0,116	629000	0,13	618000
0,102	629000	0,117	662000	0,125	684000	0,14	684000
0,109	695000	0,125	706000	0,132	728000	0,149	728000
0,122	772000	0,132	783000	0,14	794000	0,159	794000
0,137	816000	0,14	816000	0,149	838000	0,169	849000
0,151	898000	0,148	882000	0,158	882000	0,178	903000
0,164	1,02E6	0,156	936000	0,166	925000	0,187	968000
0,17	1,11E6	0,163	979000	0,174	1,01E6	0,197	1,03E6
		0,171	1,03E6	0,182	1,08E6	0,206	1,09E6
		0,178	1,09E6				

Tabela D.2. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico celular A13 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T =19,1 °C)		(T =95,7 °C)		(T =206,5 °C)		(T =291,1 °C)	
0,003	28500	0,003	32600	0,004	38700	0,005	44800
0,006	62000	0,008	66100	0,011	71200	0,012	79300
0,011	94400	0,014	97500	0,018	112000	0,021	112000
0,016	122000	0,02	132000	0,026	152000	0,03	172000
0,021	172000	0,026	182000	0,034	202000	0,04	232000
0,026	212000	0,032	242000	0,043	262000	0,05	281000
0,031	242000	0,039	291000	0,052	321000	0,06	341000
0,037	301000	0,046	351000	0,061	380000	0,077	400000
0,043	360000	0,054	409000	0,071	409000	0,083	468000
0,049	409000	0,062	458000	0,08	478000	0,088	497000
0,052	439000	0,066	487000	0,085	536000	0,094	545000
0,055	478000	0,07	526000	0,089	613000	0,094	584000
0,058	507000	0,073	584000	0,094	670000	0,099	622000
0,061	545000	0,078	613000	0,098	708000	0,105	660000
0,064	574000	0,082	641000	0,103	755000	0,111	689000
0,071	613000	0,086	680000	0,108	793000	0,117	765000
0,077	699000	0,089	736000	0,112	840000	0,122	821000
0,086	812000	0,093	765000	0,117	887000	0,128	868000
0,095	868000	0,096	793000	0,121	924000	0,134	896000
0,101	952000	0,1	877000	0,126	970000	0,139	942000
		0,104	905000			0,164	1,11E6
		0,108	943000				

Tabela D.2. Dados experimentais de queda de pressão em função da velocidade para o filtro cerâmico celular A13 nas temperaturas estudadas.

vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)	vs (m/s)	$(P_e^2 - P_s^2)/2PeL$ (Pa/m)
(T = 394,9 °C)		(T = 481,8 °C)		(T = 589,9 °C)		(T = 701,6 °C)	
0,006	39700	0,007	38700	0,008	43800	0,009	40700
0,015	85300	0,017	86300	0,019	88400	0,021	85300
0,025	142000	0,029	142000	0,033	142000	0,037	122000
0,036	182000	0,04	212000	0,039	182000	0,052	172000
0,047	222000	0,053	272000	0,046	202000	0,06	212000
0,052	262000	0,059	296000	0,053	242000	0,068	252000
0,058	282000	0,066	331000	0,06	272000	0,076	321000
0,064	321000	0,073	390000	0,068	311000	0,085	351000
0,07	360000	0,079	429000	0,076	360000	0,094	380000
0,077	390000	0,087	478000	0,084	380000	0,103	419000
0,083	429000	0,094	526000	0,092	400000	0,112	448000
0,089	497000	0,101	565000	0,1	439000	0,122	487000
0,096	545000	0,108	594000	0,108	478000	0,131	545000
0,103	574000	0,116	632000	0,116	536000	0,14	613000
0,11	594000	0,123	680000	0,124	584000	0,15	641000
0,117	632000	0,13	736000	0,132	632000	0,159	689000
0,124	660000	0,138	793000	0,141	689000	0,169	755000
0,131	718000	0,145	840000	0,149	746000	0,178	803000
0,138	793000	0,153	896000	0,157	821000	0,187	896000
0,144	831000	0,16	952000	0,166	849000	0,197	915000
0,151	878000	0,171	1,03E6	0,174	933000	0,207	943000
0,159	915000	0,178	1,09E6				

Tabela D.3. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico celular A12.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-12} (\text{m}^2)$	$k_2 \cdot 10^{-7} (\text{m})$
15,5	2,87	1,38
92,2	3,52	1,88
198	4,65	0,9
293,9	5,28	1,03
383,8	5,67	1,74
482,5	6,91	0,92
587,2	8,32	0,64
696,2	9,46	0,94

Tabela D.4. Dados das constantes de permeabilidade Darcina e não-Darciana para o filtro cerâmico celular A13.

Temperatura (°C)	$k_1 \cdot 10^{-12} (\text{m}^2)$	$k_2 \cdot 10^{-7} (\text{m})$
19,1	2,4	0,65
95,7	3,55	0,4
206,5	5,73	0,29
291,1	6,54	0,37
394,9	7,11	0,71
481,8	7,5	0,65
589,9	10,27	0,48
701,6	12,51	0,55

Tabela D.5. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico celular A12.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
15,5	1,000	1,000
92,2	1,223	1,206
198	1,618	1,456
293,9	1,836	1,656
383,8	1,973	1,828
482,5	2,405	2,000
587,2	2,895	2,172
696,2	3,293	2,339

Tabela D.6. Dados da permeabilidade Darciana (k_1) em relação à viscosidade nas diferentes temperaturas de teste para o filtro cerâmico celular A13.

Temperatura (°C)	Permeabilidade Darciana, $k_1/k_{1,0}$	Viscosidade do ar, μ/μ_0
19,1	1,000	1,000
95,7	1,479	1,217
206,5	2,390	1,472
291,1	2,730	1,650
394,9	2,967	1,844
481,8	3,131	2,000
589,9	4,284	2,178
701,6	5,218	2,344

APÊNDICE E

Dados de Filtração do Filtro de Microfibra de Quartzo.

Tabela E.1. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro do microfibra de quartzo.

Tempo (min)	$E_G (T = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_G (T = 298,5 \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_G (T = 698,5 \text{ } ^\circ\text{C})$
5	98,65457	97,22794	96,47319
10	98,61663	97,48769	97,22058
15	98,70971	98,04492	97,47613
20	98,80094	98,22265	97,47994

Tabela E.2. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro de microfibra de quartzo nos primeiros 5 minutos de filtração.

$d_p (\mu\text{m})$	$E_i (T = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_i (T = 298,5 \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_i (T = 698,5 \text{ } ^\circ\text{C})$
0,75	81,201	83,787	71,903
1,5	94,849	92,936	91,82
2,5	98,762	96,961	96,825
3,5	99,591	99,068	98,699
4,5	99,567	99,602	98,577
6	99,338	99,672	98,202
8,5	98,468	99,049	97,785
12,5	90,462	83,333	86,364

Tabela E.3. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro de microfibra de quartzo nos 20 minutos de filtração.

$d_p (\mu\text{m})$	$E_i (T = 22,9 \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_i (T = 298,5 \text{ } ^\circ\text{C})$	$E_i (T = 698,5 \text{ } ^\circ\text{C})$
0,75	80,206	88,253	79,069
1,5	94,758	93,293	94,56
2,5	98,825	96,771	98,089
3,5	99,679	99,176	99,582
4,5	99,715	99,624	99,797
6	99,646	99,757	99,755
8,5	99,219	99,81	99,684
12,5	96,532	93,333	93,182

APÊNDICE F

Dados de Filtração dos Filtros Cerâmicos Fibrosos 1A, 2D, 3D e 5A.

Tabela F.1. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro cerâmico fibroso 1A.

Tempo (min)	E_G (T =21 °C)	E_G (T =301,5 °C)	E_G (T =702,7 °C)
5	99,488	98,101	96,914
10	99,593	98,212	97,175
15	99,666	98,398	97,247
20	99,682	98,851	97,315

Tabela F.2. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro cerâmico fibroso 2D.

Tempo (min)	E_G (T =19 °C)	E_G (T =309,2 °C)	E_G (T =711,2 °C)
5	97,593	93,821	93,535
10	97,323	94,627	94,226
15	97,31	95,377	94,536
20	98,104	96,313	95,45

Tabela F.3. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro cerâmico fibroso 3D.

Tempo (min)	E_G (T =22 °C)	E_G (T =298,9 °C)	E_G (T =704,2 °C)
5	99,666	98,702	97,664
10	99,677	98,825	97,785
15	99,683	98,843	97,850
20	99,687	98,901	97,922

Tabela F.4. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro cerâmico fibroso 5A.

Tempo (min)	E_G (T =24 °C)	E_G (T =311,2 °C)	E_G (T =701,5 °C)
5	99,832	99,77	99,644
10	99,865	99,742	99,661
15	99,847	99,77	99,642
20	99,86	99,781	99,686

Tabela F.5. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 1A nos primeiros 5 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =21 °C)	E_i (T =301,5 °C)	E_i (T =702,7 °C)
0,6	72,827	67,657	50,141
0,85	79,807	77,694	91,141
2	98,953	94,098	97,102
4	99,971	98,267	99,699
6	100	99,524	99,543
8,5	100	98,898	99,389
12,5	100	95,717	100

Tabela F.6. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 2D nos primeiros 5 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =19 °C)	E_i (T =309,2 °C)	E_i (T =711,2 °C)
0,6	73,790	66,625	39,622
0,85	80,063	76,593	80,828
2	94,555	93,091	93,637
4	98,942	98,110	97,724
6	99,457	99,081	97,945
8,5	99,833	98,810	98,167
12,5	99,762	93,617	89,831

Tabela F.7. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 3D nos primeiros 5 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =22 °C)	E_i (T =298,9 °C)	E_i (T =704,2 °C)
0,6	72,827	77,289	65,049
0,85	93,67	94,638	91,141
2	99,277	98,803	97,831
4	99,981	99,876	99,742
6	100	100	99,772
8,5	100	98,81	99,389
12,5	100	100	100

Tabela F.8. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 5A nos primeiros 5 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =24 °C)	E_i (T =311,2 °C)	E_i (T =701,5 °C)
0,6	96,678	95,499	86,831
0,85	99,056	98,785	97,071
2	99,776	99,647	99,635
4	99,938	99,979	99,986
6	100	99,992	99,773
8,5	100	100	100
12,5	100	100	100

Tabela F.9. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 1A nos 20 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =21 °C)	E_i (T =301,5 °C)	E_i (T =702,7 °C)
0,6	76,446	78,475	61,845
0,85	94,152	84,721	92,12
2	99,29	96,309	97,246
4	99,983	98,547	99,828
6	100	99,501	100
8,5	100	99,542	100
12,5	100	100	100

Tabela F.10. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 2D nos 20 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =19 °C)	E_i (T =309,2 °C)	E_i (T =711,2 °C)
0,6	83,107	77,477	63,537
0,85	84,444	84,731	85,954
2	95,701	96,039	95,318
4	99,194	98,447	98,197
6	99,485	99,606	99,772
8,5	99,82	99,405	98,778
12,5	99,841	100	100

Tabela F.11. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 3D nos 20 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =22 °C)	E_i (T =298,9 °C)	E_i (T =704,2 °C)
0,6	74,127	79,159	68,907
0,85	93,998	95,225	92,12
2	99,322	98,975	97,976
4	99,987	99,947	99,871
6	100	99,869	100
8,5	100	100	100
12,5	100	100	100

Tabela F.12. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico fibroso 5A nos 20 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =24 °C)	E_i (T =311,2 °C)	E_i (T =701,5 °C)
0,6	96,879	95,593	88,642
0,85	99,165	98,851	97,44
2	99,785	99,692	99,694
4	99,938	99,957	99,993
6	100	100	100
8,5	100	100	100
12,5	100	100	100

APÊNDICE G

Dados de Filtração dos Filtros Cerâmicos Celular A12 e A13.

Tabela G.1. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro cerâmico celular A12.

Tempo (min)	E_G (T =20 °C)	E_G (T =700 °C)
5	99,915	97,286
10	99,977	97,844
15	99,983	97,946
20	99,986	98,032

Tabela G.2. Dados da eficiência de coleta global em função do tempo para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s para o filtro cerâmico celular A13.

Tempo (min)	E_G (T =20 °C)	E_G (T =700 °C)
5	99,936	97,643
10	99,948	97,81
15	99,955	98,029
20	99,969	98,074

Tabela G.3. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico celular A12 nos primeiros 5 minutos de filtração.

d_p (µm)	E_i (T =20 °C)	E_i (T =700 °C)
0,6	98,485	86,122
0,85	99,645	91,888
2	99,918	97,003
4	99,962	99,055
6	99,893	99,087
8,5	99,914	98,778
12,5	99,966	100

Tabela G.4. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico celular A13 nos primeiros 5 minutos de filtração.

d_p (µm)	E_i (T =20 °C)	E_i (T =700 °C)
0,6	97,788	88,354
0,85	99,534	94,024
2	99,926	97,48
4	99,987	99,077
6	99,968	99,543
8,5	99,951	99,389
12,5	99,933	94,915

Tabela G.5. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico celular A12 nos 20 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =20 °C)	E_i (T =700 °C)
0,6	98,815	89,319
0,85	99,759	93,898
2	99,966	97,752
4	99,999	99,313
6	100	99,543
8,5	100	100
12,5	100	100

Tabela G.6. Dados da eficiência de coleta fracionária em função do diâmetro do material particulado para as três temperaturas, na velocidade de 5 cm/s, para o filtro cerâmico celular A13 nos 20 minutos de filtração.

d_p (μm)	E_i (T =20 °C)	E_i (T =700 °C)
0,6	97,969	89,568
0,85	99,607	94,247
2	99,945	97,842
4	99,99	99,141
6	99,995	99,543
8,5	99,975	100
12,5	100	100