ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Célio Maschio
E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 30/08/2001
ORIENTADOR

200020618

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

# Desenvolvimento de Métodos para Avaliação de Processos de Filtração por meio de Simulação Numérica e Tomografia de Raios-X

Autor : **Célio Maschio**
Orientador: **Antonio Celso Fonseca de Arruda**

63/01

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

# Desenvolvimento de Métodos para Avaliação de Processos de Filtração por meio de Simulação Numérica e Tomografia de Raios-X

Autor: **Célio Maschio**
Orientador: **Antonio Celso Fonseca de Arruda**

Curso: Engenharia Mecânica.
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2001
S.P. - Brasil

UNIDADE BC
Nº CHAMADA:
T/UNICAMP
M375d
V. Ex
TOMBO 47887
PROC. 16-837/02
C D
PREÇO R$ 11,00
DATA 15-02-02
Nº CPD

CM00163820-1

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

M375d

Maschio, Célio
Desenvolvimento de métodos para avaliação de processos de filtração por meio de simulação numérica e tomografia de raios-x / Célio Maschio. --Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Antonio Celso Fonseca de Arruda.
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Filtros e filtração. 2. Tomografia computadorizada. 3. Raios X. 4. Métodos de simulação. 5. Análise numérica. 6. Processamento de imagens – Técnicas digitais. I. Arruda, Antonio Celso Fonseca de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**TESE DE DOUTORADO**

# Desenvolvimento de Métodos para Avaliação de Processos de Filtração por meio de Simulação Numérica e Tomografia de Raios-X


Autor : **Célio Maschio**

Orientador: **Antonio Celso Fonseca de Arruda**


**Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, Presidente**
**FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Denis José Schiozer**
**FEM/UNICAMP**

**Prof. Dr. Cesar Costapinto Santana**
**FEQ/UNICAMP**

**Prof. Dr. Álvaro Macedo da Silva**
**EMBRAPA/São Carlos**

**Prof. Dr. Silvio Crestana**
**EMBRAPA/São Carlos**

Campinas, 30 de agosto de 2001

## Dedicatória

Dedico este trabalho à minha esposa Marcia e à minha filha Elisa.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda, pelo constante incentivo, motivação e pela objetividade nas tomadas de decisões, durante todas as etapas, o que contribuiu de forma decisiva para a realização deste trabalho.

Agradeço, também, aos meus pais e aos meus irmãos, que sempre torcem por mim e sempre fazem votos para que eu alcance os meus objetivos. À minha esposa pela valiosa colaboração nos momentos difíceis.

À equipe do Departamento de Radiologia do Hospital Boldrini, por ter viabilizado o uso do tomógrafo daquele hospital.

A todos os colegas do Departamento de Engenharia de Materiais e do Departamento de Engenharia de Petróleo que estiveram juntos nesta caminhada e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

# Resumo

MASCHIO, Célio, *Desenvolvimento de Métodos para Avaliação de Processos de Filtração por meio de Simulação Numérica e Tomografia de Raios-X*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 171 p. Tese (Doutorado)

O objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de metodologias para o estudo de filtros e processos de filtração, utilizando a tomografia de raios-X, técnicas de processamento digital de imagens e simulação numérica. Os ensaios convencionais utilizados pelos fabricantes são realizados através da medida de parâmetros, tais como pressão e vazão, em pontos localizados a montante e a jusante do filtro. Estes ensaios não são eficientes na caracterização de defeitos e não revelam como ocorre o processo de saturação no interior do filtro. Neste trabalho, a tomografia de raios-X foi utilizada para duas finalidades básicas: estudar a distribuição de contaminantes e analisar defeitos no interior de elementos filtrantes. Os modelos de filtração encontrados na literatura não levam em conta o efeito do acúmulo de contaminantes no desempenho do filtro ao longo do processo de filtração. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo acoplando-se as equações de filtração com as equações fenomenológicas (lei de Darcy e equação da continuidade), de tal forma que o acúmulo de partículas no meio poroso (filtro) fosse considerado na simulação do processo de filtração. Os resultados demonstraram que o processo de saturação no interior dos elementos analisados não ocorre de forma homogênea, ou seja, o acúmulo de partículas é predominante em determinadas regiões. Em geral, há formação de canais preferenciais e o espaço interno do filtro não é totalmente utilizado na captura de partículas. Demonstrou-se também que, em alguns casos, o comportamento do filtro não é coerente com a especificação do fabricante. Foi possível, por fim, a utilização dos dados experimentais, obtidos via tomografia, para a validação do modelo teórico desenvolvido.

*Palavras chave*

Processos de Filtração, Tomografia de Raios-X, , Simulação Numérica, Processamento Digital de Imagens

## Abstract

MASCHIO, Célio, *Development of Methods for Evaluation of Filtration Process Through Numerical Simulation and X-Ray Tomography*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2001. 171 p. Tese (Doutorado)

The development of methods for analysis of filters and filtration process, using X-ray computerized tomography, digital image processing and numerical simulation, was the objective of this work. Tests conventionally used by filter manufacturers are made through the measurement of parameters, such as flow and pressure, at upstream and downstream of the filter. These tests are not efficient in the characterization of defects and do not reveal how the saturation process occurs within the filter. In this work, X-ray computerized tomography was used for two basic purposes: to evaluate contaminant distribution and to detect defects within the interior of the filter elements. The filtration models found in the literature do not consider the effect of contaminant concentration on the filter efficiency during the filtration process. In this work, filtration equations and phenomenological equations (Darcy's law and continuity equation) were coupled and a model that takes into account the contaminant accumulation on the filter performance was developed. The results demonstrated that the saturation process within the analyzed filters is not homogeneous, that is, the accumulation of particles is predominant in some regions. Generally, there are preferential channels and the interior of the filter elements is not totally utilized. In some cases, it was also demonstrated that the filter behavior does not agree with the manufacturer specifications. Finally, it was possible to use the experimental data obtained with X-ray computerized tomography, in order to validate the theoretical developed model.



*Key words*

Filtration Process, X-Ray Computerized Tomography, Numerical Simulation, Digital Image Processing

# Índice

**Lista de Figuras** ..... **iv**
**Lista de Tabelas** ..... **ix**
**Nomenclatura** ..... **x**

**1 INTRODUÇÃO** ..... **1**
1.1 MOTIVAÇÃO ..... 1
1.2 OBJETIVOS ..... 4
*1.2.1 Aplicação da técnica de tomografia computadorizada de Raios-X na avaliação de filtros e processo de filtração* ..... *5*
*1.2.2 Desenvolvimento de um modelo de filtração* ..... *5*
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO ..... 6

**2 FILTROS E PROCESSOS DE FILTRAÇÃO** ..... **7**
2.1 INTRODUÇÃO ..... 7
2.2 CONTAMINANTES ..... 8
2.3 MECANISMOS DE CAPTURA DE PARTÍCULAS EM MEIOS POROSOS ..... 11
*2.3.1 Captura mecânica* ..... *11*
*2.3.2 Captura por adsorção* ..... *12*
2.4 FILTROS TIPO CARTUCHO ..... 13
*2.4.1 Principais tipos e construção* ..... *13*
*2.4.2 Eficiência e razão de filtração* ..... *17*
*2.4.3 Ensaios não destrutivos* ..... *19*
2.4.3.1 Método da bolha ..... 20
2.4.3.2 Permeabilidade ao ar ..... 20
*2.4.4 Ensaios destrutivos* ..... *22*
2.5 FILTRAÇÃO POR SUPERFÍCIE (FILTROS DO TIPO MEMBRANA) ..... 23
*2.5.1 Características do processo* ..... *28*
2.5.1.1 Forças atuantes ..... 29
2.5.1.2 Força de Arraste ..... 31
2.5.1.3 Força da gravidade ..... 32
2.5.1.4 Resistência ..... 32
2.5.1.5 Efeito da estrutura dos poros no processo de captura de partículas ..... 33
2.5.1.6 Efeito da concentração de sólidos no processo de bloqueio dos poros ..... 34
2.5.1.7 Efeito da relação entre o tamanho dos poros do filtro e o tamanho das partículas ..... 35
2.5.1.8 Efeito da estrutura dos poros na resistência do filtro e na concentração crítica ..... 35
2.6 FILTRAÇÃO EM PROFUNDIDADE ..... 36
2.7 FILTRAÇÃO POR ADSORÇÃO ..... 37
2.8 FILTROS DO TIPO LEITO GRANULAR ..... 39

**3 MODELAMENTO MATEMÁTICO E SIMULAÇÃO NUMÉRICA ..... 41**
3.1 INTRODUÇÃO ..... 41
3.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA ..... 44
3.3 ESCOAMENTO ..... 45
3.4 MODELAMENTO DA ESTRUTURA DO FILTRO ..... 47
*3.4.1 Relação entre porosidade e permeabilidade ..... 50*
3.5 EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE FILTRAÇÃO ..... 53
3.6 SIMULAÇÃO NUMÉRICA ..... 57
*3.6.1 Domínio físico e domínio computacional ..... 57*
*3.6.2 Método das diferenças finitas ..... 57*
*3.6.3 Discretização por meio de diferenças finitas ..... 59*
*3.6.4 O Método A.D.I (Alternating-Direction Implicit) ..... 62*
*3.6.5 Condições de contorno ..... 63*
3.6.5.1 Condições de contorno do tipo Dirichlet ..... 63
3.6.5.2 Condições de contorno do tipo do tipo Neumann ..... 64
*3.6.6 Critério de convergência ..... 65*
*3.6.7 Estratégia de injeção de partículas ..... 66*

**4 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X E APLICAÇÕES ..... 69**
4.1 INTRODUÇÃO E ASPECTOS TEÓRICOS ..... 69
*4.1.1 Parâmetros relacionados à operação de um tomógrafo ..... 74*
*4.1.2 Evolução dos equipamentos de tomografia de Raios-X ..... 76*
4.1.2.1 Primeira geração de tomógrafos ..... 76
4.1.2.2 Segunda geração de tomógrafos ..... 77
4.1.2.3 Tomógrafos de geração superior ..... 77
*4.1.3 Dimensão dos objetos tomografados ..... 79*
*4.1.4 Materiais ..... 79*
*4.1.5 Artefatos ..... 80*
*4.1.6 Procedimentos ..... 81*
4.2 APLICAÇÕES DE TÉCNICAS TOMOGRÁFICAS ..... 83

**5 METODOLOGIA ..... 85**
5.1 APARATO EXPERIMENTAL ..... 85
5.2 CONTAMINANTES E FILTROS UTILIZADOS ..... 86
5.3 TESTES DE CONTAMINAÇÃO DOS FILTROS ..... 89
5.4 ENSAIOS TOMOGRÁFICOS ..... 90
5.5 TRATAMENTO DAS IMAGENS ..... 90
*5.5.1 O software Khoros e o ambiente cantata ..... 91*
*5.5.2 Pré-processamento das imagens ..... 92*
5.6 ESTRATÉGIA DE ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS ..... 95
*5.6.1 Detecção do contaminante ..... 95*
*5.6.2 Segmentação estratificada e análise estatística das imagens ..... 95*
*5.6.3 Reconstrução tridimensional ..... 98*

**6 RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 101**
6.1 ANÁLISE PRELIMINAR ..... 101
*6.1.1 Detecção do contaminante ..... 102*
*6.1.2 Defeitos em filtros de carbono ativado ..... 103*
*6.1.3 Defeitos em filtros do tipo resinado ..... 105*
6.2 FATOR DE FORMA ..... 107
6.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS ..... 109
*6.3.1 Influência do tamanho de partícula ..... 109*
*6.3.2 Influência da velocidade de filtração ..... 120*
*6.3.3 Influência do tipo de contaminante ..... 125*
6.4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA ..... 127
*6.4.1 Resultados das simulações 1, 2 e 3 ..... 131*
6.4.1.1 Distribuição espacial de partículas ..... 131
6.4.1.2 Redução da permeabilidade ..... 136
6.4.1.3 Partículas capturadas ao longo do tempo ..... 138
*6.4.2 Resultados das simulações 4, 5 e 6 ..... 140*
6.4.2.1 Distribuição espacial de partículas ..... 140
6.4.2.2 Redução de permeabilidade ..... 143
6.4.2.3 Partículas capturadas ao longo do tempo ..... 144
*6.4.3 Influência do diâmetro da fibra ..... 146*
*6.4.4 Influência da densidade das partículas ..... 150*
*6.4.5 Influência do fator de empacotamento ..... 152*

**7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 155**

**8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 159**

**ANEXO A - PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE ..... 171**

# Lista de figuras

1.1 - Diagrama esquemático mostrando a possibilidade de ocorrer sobreposição de defeitos em filtro constituído por fibras ..... 3

2.1 - Gráficos da distribuição de partículas (MELTZER, 1987) ..... 9
2.2 - Aspectos de diferentes tipos de contaminantes artificiais (VERDEGAN, 1997); ..... 10
2.3 - Mecanismo de captura mecânica - interceptação direta ..... 11
2.4 - Subcasos de captura mecânica; a) peneiramento e b) ponte ..... 12
2.5 - Captura de partícula por adsorção ..... 12
2.6 - Exemplos de filtros do tipo carbono ativado ..... 16
2.7 - Curva característica da eficiência de um filtro tipo cartucho em função do tamanho de partículas (Modificada de SANDSTEDT AND WEISENBERGER, 1985) ..... 19
2.8 - Aspectos de um filtro tipo membrana: a) limpo, b) e c) contaminados ..... 25
2.9 - Exemplos de modelos de poros formados por diferentes formas de entrelaçamento das fibras na construção de um filtro fibroso (LU *et al.*, 1997) ..... 28
2.10 - Formas de acúmulo de partículas em uma filtração de superfície ..... 29
2.11 - Diagrama esquemático das forças atuantes sobre partículas na filtração por superfície (LU *et al.*, 1997) ..... 30
2.12 - Estágios de saturação de um determinado tipo de poro (LU *et al.* 1997) ..... 34
2.13 - Representação da filtração em profundidade ..... 36
2.14 - Comparação entre a filtração por superfície e o processo de filtração por adsorção ..... 38
2.15 - Densidade de partículas aderidas à fibra de um filtro (filtração por adsorção) ..... 38

3.1 - Modelo de poros apresentado por REGE AND FOGLER (1987) ..... 43
3.2 - Redução de permeabilidade no modelo de REGE AND FOGLER (1987) ..... 44
3.3 - Representação esquemática das linhas de fluxo na entrada e saída do filtro ..... 45
3.4 - Esquema de coordenadas cilíndricas para a definição das equações ..... 47
3.5 - Modelamento da distribuição acumulada de poros em função da densidade de empacotamento e do diâmetro de poros: $\beta$ = 4,0 e $0,05 \leq \alpha \leq 0,40$ ..... 49
3.6 - Modelamento da distribuição acumulada de poros em função da densidade de empacotamento e do diâmetro de poros: $\beta$ = 4,0 e $0,05 \leq \alpha \leq 0,170$ ..... 49
3.7 - Representação esquemática de um elemento de volume ..... 50
3.8 - Esquema de uma célula unitária com o posicionamento espacial de uma fibra ..... 52
3.9 - Representação esquemática de um domínio x-y em diferenças finitas ..... 58
3.10 - Representação do domínio retangular (computacional) e correlação com o domínio físico (filtro) ..... 59
3.11 - Esquema usado na definição das condições de contorno ..... 65
3.12 - Diagrama esquemático da simulação da injeção de partículas ..... 68

4.1 - Diagrama esquemático das projeções em sistema de tomografia ..... 70
4.2 - Diagrama esquemático de um tomógrafo ..... 71
4.3 - Atenuação de um feixe de intensidade $I_0$ em uma amostra heterogênea ..... 71
4.4 - Diagrama esquemático de uma seqüência de cortes tomográficos (*slices*) ..... 72
4.5 - Imagem tomográfica de um tarugo de alumínio mostrando quatro furos (a), mapa de *pixels* da região demarcada na parte a ..... 73
4.6 - Relação entre espessura de corte, voxel e *pixel* ..... 74
4.7 - Tamanho do *pixel* em função do campo de visão e do tamanho da matriz ..... 75
4.8 - Diagrama esquemático da primeira geração de tomógrafos ..... 76
4.9 - Diagrama esquemático da primeira geração de tomógrafos ..... 77
4.10 - (a) Terceira geração de tomógrafos; (b) Quarta geração de tomógrafos ..... 78
4.11 - Representação de um sistema de tomografia helicoidal ..... 78
4.12 - Exemplo de uma imagem de um tarugo de alumínio (a) e um perfil de intensidade ..... 80

5.1 - Aparato experimental utilizado nos testes de contaminação artificial dos filtros ..... 86
5.2 - Distribuição de partículas do contaminante ..... 87
5.3 - (a) Filtros do tipo resinado (escuros) e do tipo bobinado (claros), (b) carcaça transparente ..... 88
5.4 - Tela do ambiente *cantata* mostrando um *workspace* desenvolvido para a importação das imagens tomográficas ..... 92
5.5 - Esquema da seqüência das imagens originais apresentando um desalinhamento na direção vertical e na direção horizontal ..... 94
5.6 - Esquema da seqüência das imagens originais após o alinhamento e uma nova extração ..... 94
5.7 - Representação esquemática de um arquivo contendo todas as imagens de um filtro ..... 94
5.8 - Diagrama esquemático da aplicação da segmentação estratificada na seqüência de imagens: total de máscaras = espessura do filtro (em *pixels*) x número de *slices* (i x j) ..... 96
5.9 - Exemplos de máscaras na forma de anéis ..... 97
5.10 - *Workspace* implementado no *Khoros* e destinado ao processo de segmentação estratificada ..... 97
5.11 - Aplicação de máscaras para a reconstrução tridimensional dos filtros em diferentes regiões ..... 98
5.12 - Exemplo de um dos *Workspaces* implementados no *Khoros* para a reconstrução tridimensional das imagens ..... 99
5.13 - *Workspaces* para a implementação das rotinas *Count Loop* (a) e *Procedure* (b) ..... 100

6.1 - Exemplos de imagens tomográficas de um filtro virgem (a) e do mesmo filtro contaminado (b) ..... 102
6.2 - Gráfico correspondente aos perfis indicados na figura 6.1 ..... 103
6.3 - Seqüência de imagens de um filtro de carbono ativado mostrando uma série de defeitos ..... 104
6.4 - Reconstrução gráfica da primeira imagem da seqüência da figura 6.3 ..... 104
6.5 - Seqüência de imagens de um filtro resinado mostrando regiões de alta densidade ..... 105
6.6 - Picos de atenuação em imagens de um filtro resinado: defeitos em forma de aglomerados de fibras e resina ..... 106
6.7 - Queda de pressão em função da vazão para os tipos de filtros analisados ..... 107
6.8 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 1 ..... 111
6.9 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 2 ..... 111
6.10 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 3 ..... 112
6.11 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 1 ..... 113
6.12 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 2 ..... 113
6.13 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 3 ..... 114
6.14 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 4 ..... 115
6.15 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 5 ..... 115

6.16 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 6 ..... 116
6.17 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 4 ..... 117
6.18 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 5 ..... 117
6.19 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 6 ..... 118
6.20 - Perfil de concentração em função da espessura da amostra 2 ..... 119
6.21 - Perfil de concentração em função da espessura da amostra 5 ..... 120
6.22 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 9 ..... 121
6.23 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 10 ..... 121
6.24 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 11 ..... 122
6.25 (cont.)- Modelamento da distribuição de partículas nas amostras 9 (a), 10 (b) e 11 (c) ..... 124
6.26 - Perfil acumulado relativo às amostras 9, 10 e 11 ..... 124
6.27 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 12 ..... 126
6.28 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 13 ..... 126
6.29 - Funções lineares para o fator de empacotamento ..... 129
6.30 - Concentração espacial de partículas para diferentes configurações de empacotamento ..... 130
6.31 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 1,
(b) ensaio experimental com a amostra 6 ..... 132
6.32 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 2,
(b) ensaio experimental com a amostra 5 ..... 133
6.33 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 3,
(b) ensaio experimental com a amostra 7 ..... 134
6.34 - Perfil de distribuição ao longo da espessura para a simulação 1 e
ensaio experimental com a amostra 6 ..... 135
6.35 - Perfil de distribuição ao longo da espessura para a simulação 2 e
ensaio experimental com a amostra 5 ..... 135
6.36 - Perfil de distribuição ao longo da espessura para a simulação 3 e
ensaio experimental com a amostra 7 ..... 136
6.37 - Curvas de redução de permeabilidade para as simulações 1, 2 e 3 (linhas) e para os
ensaios experimentais com as amostras 5, 6 e 7 (símbolos) ..... 138
6.38 - Número de partículas capturadas ao longo do tempo: simulações 1 e 2 ..... 139
6.39 - Número de partículas capturadas ao longo do tempo: simulação 3 ..... 139
6.40 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 4, (b) ensaio ..... 141

6.41 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 5, (b) ensaio ..... 142
6.42 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 6, (b) ensaio ..... 143
6.43 - Curvas de redução de permeabilidade para as simulações 4, 5 e 6 (linhas) e para as amostras 2, 3 e 8 (símbolos) ..... 144
6.44 - Partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 4 ..... 145
6.45 - Partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 5 ..... 146
6.46 - Partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 6 ..... 146
6.47 - Distribuição espacial de partículas referente à simulação 7 ..... 148
6.48 - Distribuição espacial de partículas referente à simulação 8 ..... 149
6.49 - Distribuição espacial de partículas referente à simulação 9 ..... 149
6.50 - Partículas capturadas ao longo do tempo para as simulações 7, 8 e 9 ..... 150
6.51 - Concentração espacial de partículas para as simulações 6 (a) e 10 (b) ..... 151
6.52 - Partículas capturadas ao longo do tempo para as simulações 6 e 10 ..... 151
6.53 - Distribuição espacial de partículas referentes às simulações 11 (a), 12 (b), 13 (c) e 14 (d) ..... 153
6.54 - Curvas de redução de permeabilidade para as simulações 11, 12, 13 e 14 ..... 154

# Lista de tabelas

2.1 - Valores de $\beta^x$ e $E_x$ ..... 18

2.2 - Relação entre porosidade e pressão resultante de um teste de permeabilidade ao ar ..... 21

5.1 - Descrição do contaminante artificial utilizado nos testes ..... 87

5.2 - Descrição dos testes realizados de acordo com o tipo de amostra ..... 89

6.1 - Parâmetros para o cálculo do fator de forma ..... 109

6.2 - Parâmetros utilizados nas simulações 1 a 6 ..... 129

6.3 - Parâmetros utilizados nas simulações 7 a 14 ..... 148

6.4 - Eficiência em função do fator de empacotamento ..... 153

# Nomenclatura

## *Letras Latinas*

| | | |
|---|---|---|
| $A$ | área de uma seção transversal | $[m^2]$ |
| $C_{in}$ | concentração inicial de partículas | $[kg/m^3]$ |
| $C_0$ | concentração média de partículas | $[kg/m^3]$ |
| $d_P$ | coeficiente de difusão de uma determinada partícula | $[m^2/s]$ |
| $D_{CV}$ | diâmetro do campo de visão em um tomógrafo | [m] |
| $D$ | diâmetro de poro | [m] |
| $\overline{D}$ | diâmetro médio de poro | [m] |
| $D_F$ | diâmetro de uma determinada fibra | [m] |
| $D_{máx}$ | diâmetro máximo de poro | [m] |
| $D_P$ | diâmetro de uma determinada partícula | [m] |
| $D_{Pmín}$ | diâmetro mínimo de uma determinada partícula | [m] |
| $D_{Pmáx}$ | diâmetro máximo de uma determinada partícula | [m] |
| $e$ | espessura de um elemento de discretização do filtro | [m] |
| $e_F$ | espessura do meio filtrante | [m] |
| $e_M$ | espessura de um meio poroso | [m] |
| $E_X$ | eficiência unitária para um determinado tamanho de partícula | [-] |
| $F_C$ | fator de correção para a equação da força de arraste sobre uma partícula | [-] |
| $F_d$ | força de arraste devido à ação do escoamento | [N] |
| $F_g$ | força da gravidade | [N] |
| $f(D)$ | representação da função *gamma* | [-] |
| $g$ | aceleração da gravidade | $[m/s^2]$ |
| $h_C$ | distância entre uma partícula e a camada sólida | [m] |
| $h$ | espessura | [m] |
| $I$ | intensidade de energia do feixe de Raios-X incidente | [keV] |

| | | |
|---|---|---|
| $I_0$ | intensidade de energia do feixe de Raios-X emergente | [keV] |
| $I_X$ | número de partículas presentes na entrada de um filtro | |
| k | permeabilidade | [$m^2$] |
| $k_X$ | permeabilidade na direção X | [$m^2$] |
| $k_Z$ | permeabilidade na direção Z | [$m^2$] |
| $K(\delta=90^0)$ | permeabilidade no modelo de células para um fluxo perpendicular a um fibra | [$m^2$] |
| $K_\perp$ | componente de permeabilidade em relação à direção perpendicular de escoamento | [$m^2$] |
| $K_\parallel$ | componente de permeabilidade em relação à direção paralela de escoamento | [$m^2$] |
| $K_{i,j}$ | permeabilidade de um elemento de coordenadas i,j | [$m^2$] |
| Ku | número de Kuwabara | [-] |
| L | comprimento do filtro | [m] |
| $L_I$ | dimensão do lado de uma imagem | [m] |
| $L_{pixel}$ | largura de um *pixel* | [m] |
| $m_t$ | massa da torta em um processo de filtração por superfície | [kg] |
| N | número de partículas geradas e injetadas a cada *time step* | |
| $N_R$ | parâmetro de interferência entre uma fibra e uma partícula | ($D_P/D_F$) |
| $n_{pixels}$ | número de *pixels* em uma imagem tomográfica | |
| $n_C$ | número de camadas | |
| $n_{in}$ | concentração de partículas na entrada de uma filtro | [$kg/m^3$] |
| $n_{out}$ | concentração de partículas na saída de um filtro | [$kg/m^3$] |
| $O_X$ | número de partículas presentes na saída de um filtro | |
| p | pressão | [Pa] |
| Pe | número de Peclet | [-] |
| $\tilde{q}$ | fonte | [$kg/m^3.s$] |
| Q | vazão volumétrica | [$m^3/s$] |
| $R_b$ | resistência devido a poros bloqueados | [1/m] |
| $R_c$ | resistência exercida pela camada sólida | [1/m] |
| $Re_{i,j}$ | número de Reynolds relativo um elemento de coordenadas i,j | [-] |
| $R_L$ | resistência devido ao filtro limpo | [1/m] |
| $R_{LT}$ | resistência local da torta | [1/m] |

| | | |
|---|---|---|
| $R_m$ | resistência do meio filtrante | [1/m] |
| $R_T$ | resistência total | [1/m] |
| r | posição radial | [m] |
| $r_e$ | raio externo do filtro | [m] |
| $r_w$ | raio interno do filtro | [m] |
| S | área superficial de um grão em um filtro granular | [$m^2$] |
| s | fração em massa de sólido no líquido | [kg/kg] |
| $s_t$ | fração em massa de sólido na trota de filtração | [kg/kg |
| $St_{i,j}$ | número de Stokes relativo a um elemento de coordenadas i,j | [-] |
| t | tempo | [s] |
| T | tortuosidade | [-] |
| u | velocidade | [m/s] |
| **u** | campo de velocidade | [m/s] |
| $u_{i,j}$ | velocidade do fluido em um elemento de coordenadas i,j | [m/s] |
| $u_P$ | velocidade da partícula | [m/s] |
| $u_\infty$ | velocidade no infinito | [m/s] |
| v | volume do filtrado | [$m^3$] |
| $V_{i,j}$ | volume total de um elemento de coordenadas i,j | [$m^3$] |
| $(V_{sol.})_{i,j}$ | volume de material em um elemento de coordenada i,j | [$m^3$] |
| $w_i$ | espessura de um material com coeficiente de atenuação $\kappa_i$ | [m] |

***Letras gregas***

| | | |
|---|---|---|
| $\alpha$ | densidade de empacotamento de um filtro | |
| $\alpha_{i,j}$ | densidade de empacotamento de um elemento de coordenadas i,j | |
| $\beta$ | parâmetro relacionado à densidade de empacotamento do filtro | [-] |
| $\beta_T$ | ângulo de emissão de um feixe de Raios-X em um sistema de tomografia | [°] |
| $\beta_X$ | razão de filtração para partículas de tamanho X | [-] |
| $\delta$ | ângulo de posicionamento espacial de uma determinada fibra | [°] |
| $\Delta p$ | diferença de pressão | [Pa] |
| $\Delta X$ | passo de discretização na direçaõ X | |
| $\Delta Z$ | passo de discretização na direçaõ Z | |

| | | |
|---|---|---|
| $\Delta y$ | passo de discretizaçção na direção y | |
| $\Delta r$ | elemento de diferença radial | |
| $\Delta t$ | *time step* | [s] |
| $\phi$ | porosidade | |
| $\phi_{av}$ | porosidade média da torta | |
| $\phi_{b,i}$ | porosidade da i-ésima camada para o filtro com poros bloqueados | |
| $\phi_{L,i}$ | porosidade da i-ésima camada para o filtro limpo | |
| $\phi_L$ | porosidade local da torta | |
| $\phi_{i,j}$ | porosidade de um elemento de coordenadas i,j | |
| $\phi_{i,j}^{new}$ | porosidade após o acúmulo de N partículas no elemento de coordenadas i,j | |
| $\Theta$ | ângulo de molhabilidade | [°] |
| $\eta_D$ | probabilidade de uma partícula ser capturada devido ao mecanismo de difusão | |
| $\eta_F$ | probabilidade de uma partícula ser capturada devido à combinação dos diversos mecanismos | |
| $\eta_G$ | probabilidade global de captura | |
| $\eta_I$ | probabilidade de uma partícula ser capturada devido ao mecanismo de impactação | |
| $\eta_{IR}$ | probabilidade de uma partícula ser capturada devido ao mecanismo de impacto-interceptação | |
| $\eta_R$ | probabilidade de uma partícula ser capturada devido ao mecanismo de interceptação pura | |
| $\eta_T$ | probabilidade total de uma partícula ser capturada | |
| $\kappa^*$ | fator de correção para a equação de Poiseville | |
| $\kappa_i$ | coeficiente de atenuação de um determinado material | [1/m] |
| $\kappa_{água}$ | coeficiente de atenuação da água | [1/m] |
| $\kappa_{mat}$ | coeficiente de atenuação de um determinado material | [1/m] |
| $\lambda$ | coeficiente de filtração | [1/m] |
| $\mu_f$ | viscosidade dinâmica do fluido | [Pa.s] |
| $\nu$ | viscosidade cinemática | [$m^2/s$] |
| $\rho$ | massa específica | [$kg/m^3$] |

| | | |
|---|---|---|
| $\rho_f$ | massa específica do fluido | [kg/m$^3$] |
| $\rho_P$ | massa específica da partícula | [kg/m$^3$] |
| $\rho_s$ | massa específica do sólido em uma torta de filtração | [kg/m$^3$] |
| $\sigma$ | parâmetro relacionado ao formato da distribuição de poros | [-] |
| $\sigma_L$ | tensão superficial de um líquido | [N/m] |
| $\xi$ | parâmetro relacionado à heterogeneidade do meio filtrante | [-] |

# Capítulo 1

# Introdução

## 1.1 Motivação

Os ensaios de elementos filtrantes de utilização doméstica e industrial (do tipo cartucho, por exemplo), pertencem basicamente a duas categorias: os *ensaios destrutivos* e os *ensaios não destrutivos*. O primeiro recebe este nome pelo fato de que o elemento filtrante não pode ser reutilizado após o ensaio e, o segundo, porque o elemento é reutilizado.

A realização de um ensaio destrutivo consiste em submeter o elemento filtrante a um processo de filtração no qual utilizam-se determinados tipos de contaminantes artificiais. Trata-se de sistemas particulados, geralmente em forma de pó. Adiciona-se ao fluido de teste, normalmente água, o contaminante em concentrações e distribuição de tamanhos conhecidos. O elemento filtrante é instalado em uma linha instrumentada, na qual o fluido particulado deve circular. O principal objetivo de um ensaio destrutivo é determinar os parâmetros de filtração do elemento, tais como capacidade de retenção, ou seja, a menor partícula que ele é capaz de reter, estabelecer a razão $\beta$, que consiste em se determinar a relação entre as partículas de um determinado tamanho que o elemento retém e as que deixa passar.

Na indústria de filtração, antes de se realizar um ensaio destrutivo, realiza-se um teste preliminar de medida de vazão e pressão, com o elemento virgem. Conhecendo-se a curva de vazão e pressão do elemento, este é solicitado ao fluido particulado. Após o teste, estabelecem-se relações entre a capacidade de retenção do elemento e o comportamento de vazão e pressão. Estas relações geram padrões que são utilizados para a realização dos ensaios não destrutivos. Os

ensaios destrutivos são mais dispendiosos e demorados quando comparados com os não destrutivos.

Os ensaios não destrutivos são ensaios corriqueiros realizados na linha de produção com o objetivo de se verificar a integridade dos elementos e, principalmente, obter parâmetros tais como permeabilidade e capacidade de retenção, de forma rápida. Basicamente, faz-se passar um fluxo de ar pelo elemento e mede-se a queda de pressão. Comparando-se com os dados fornecidos pelos ensaios destrutivos, classifica-se o elemento. Por exemplo, se a queda de pressão estiver numa faixa entre 62 Pa e 200 Pa, um filtro de 25 mm de espessura é classificado como sendo de 50 μm (WILLIAMS, 1992). Este é o parâmetro básico de especificação comercial de um elemento filtrante.

A limitação dos ensaios realizados em elementos filtrantes, tanto os destrutivos quanto os não destrutivos, é que o interior do elemento em teste permanece como uma caixa preta, ou seja, os testes "enxergam" o elemento apenas entre a entrada e a saída. Com relação aos ensaios destrutivos, não se revela como o contaminante se distribui no interior do elemento. Desta forma, não se pode afirmar se o elemento está sendo utilizado de forma otimizada, ou seja, se todo o seu interior está atuando na retenção do contaminante. Esta informação pode ser útil na otimização do projeto de filtros, como por exemplo, na adaptação da geometria e espessura de um elemento.

Com relação aos ensaios não destrutivos, o problema da "caixa preta" pode estar relacionado ao mascaramento de um defeito interno do elemento filtrante. Por exemplo, suponha que haja duas regiões defeituosas: uma mais densa e outra menos densa (Figura 1.1). No caso de um filtro constituído por fibras, a região mais densa poderia ser um acúmulo excessivo de fibras, enquanto que a região menos densa poderia ser uma escassez de fibras. Uma vez que o teste trabalha com o elemento como um todo, estas duas regiões podem ser sobrepostas e o elemento considerado ausente de defeitos.

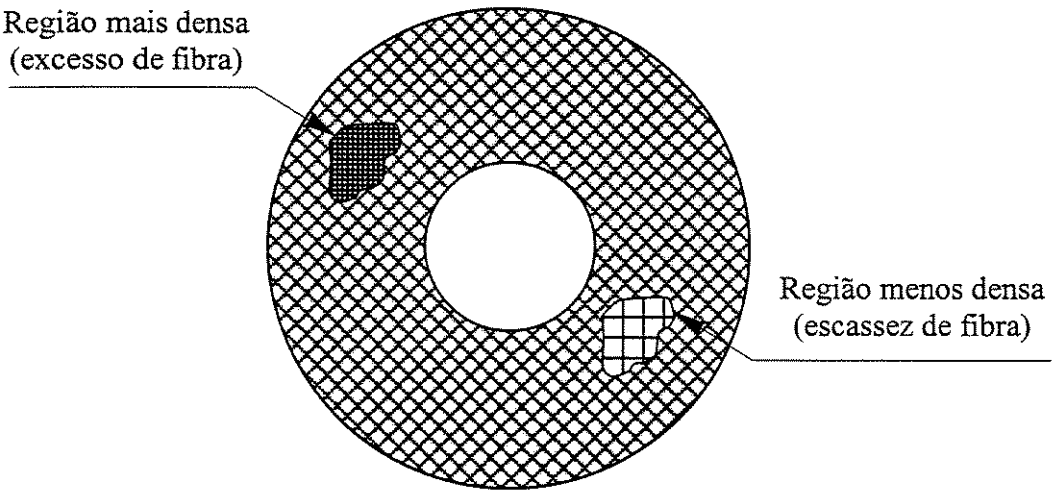



Figura 1.1 - Diagrama esquemático mostrando a possibilidade de ocorrer sobreposição de defeitos em filtro constituído por fibras

Tendo em vista a limitação dos testes padrão em não visualizarem o interior do elemento, a tomografia computadorizada de Raios-X surge como uma ferramenta capaz de cobrir esta lacuna.

A tomografia computadorizada de Raios-X, desenvolvida inicialmente para a área médica, ganhou um espaço significativo, com aplicações em diversas outra áreas, principalmente na área de engenharia. Seu atrativo reside no fato de fornecer a imagem interna de um objeto opaco, de forma rápida e não invasiva. Vantagens sobre a radiografia convencional, como por exemplo, a possibilidade de se localizar um defeito em três dimensões e a natureza quantitativa, também conferem um fator atrativo para esta técnica.

Levando-se em conta o potencial da tomografia computadorizada de Raios-X na visualização interna, e a lacuna deixada pelos testes padrões, propõe-se, neste trabalho, desenvolver a aplicação da técnica na avaliação de processo de filtração, por meio da visualização do interior de elementos filtrantes, com o apoio do uso de processamento digital de imagens. Propõe-se, também, mostrar a viabilidade da técnica na detecção de defeitos em filtros.

Em relação a filtros constituídos por fibras, grande parte dos modelos de filtração encontrados na literatura, normalmente se concentram no elemento filtrante em si, ou seja, os modelos apresentados têm como objetivo prever a eficiência de filtração levando-se em conta o filtro virgem. Dentre estes modelos, poucos consideram as heterogeneidades do meio, tais como a distribuição espacial das fibras e a variação na porosidade e permeabilidade, por exemplo (SCHWEERS AND LÖFFLER, 1994 e ZHU, 2000). Menor ainda é o número dos que consideram esta variação ao longo do processo de filtração, ou seja, poucos modelam o filtro dinamicamente (THOMAS el al., 1999).

Portanto, neste trabalho propõe-se, também, o desenvolvimento de um modelo matemático e numérico para a simulação do processo de filtração estudado (filtração em profundidade por filtros constituídos por fibras), no qual se leve em conta as heterogeneidades do elemento filtrante, bem como a influência do acúmulo do contaminante em propriedades tais como a porosidade e a permeabilidade. Ou seja, em um processo de filtração, o acúmulo de partículas no meio poroso altera a porosidade e a permeabilidade. A alteração da permeabilidade altera o escoamento que, por sua vez, influencia a eficiência do filtro e assim sucessivamente. Desta forma, o escoamento é recalculado para cada passo no tempo de simulação, de forma que a retenção de partículas entre no modelo como um processo dinâmico.

Uma das dificuldades encontradas em relação a modelos numéricos é a sua validação por meio de dados experimentais. Boa parte dos modelos encontrados na literatura também não apresenta comparações com resultados experimentais. Neste trabalho, pretende-se utilizar os resultados experimentais originados da tomografia para a validação do modelo desenvolvido.

## 1.2 Objetivos

Dois são os objetivos centrais deste trabalho, dentro dos quais identificam-se os objetivos decorrentes:

### *1.2.1 Aplicação da técnica de tomografia computadorizada de Raios-X na avaliação de filtros e processo de filtração*

Dentro deste objetivo principal, pode-se identificar os seguintes objetivos secundários:

- Investigação de defeitos internos em elementos filtrantes, tais como inclusões, regiões de baixa densidade, etc;
- Mapeamento da distribuição interna de contaminantes em elementos filtrantes submetidos a testes de contaminação artificial;
- Desenvolvimento de métodos e estratégias de análise utilizando-se os recursos de processamento digital de imagens. Tais métodos compreendem as técnicas de visualização 3D e a segmentação estratificada, de forma a permitirem o mapeamento de sólidos nos elementos filtrantes.

### *1.2.2 Desenvolvimento de um modelo de filtração*

Dentro deste objetivo, os objetivos secundários são os seguintes:

- Desenvolver um modelo matemático e numérico para a simulação do processo de filtração estudado experimentalmente. O modelo deverá levar em conta a heterogeneidade do meio filtrante, tais como porosidade e permeabilidade, bem como considerar o efeito do acúmulo de contaminantes sobre o processo de filtração;

- Utilizar equações fenomenológicas (equação da continuidade e equação de Darcy) acopladas com as equações de filtração;

- Validar o modelo através dos dados obtidos via tomografia.

## 1.3 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em 8 capítulos. O presente apresenta brevemente o tema e descreve os objetivos básicos. O Capítulo 2 traz os conceitos e as descrições necessárias para se entender o assunto relacionado aos filtros e aos processos de filtração. O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do modelo numérico. Uma descrição sumária da técnica de tomografia utilizada neste trabalho, bem como sua aplicação em áreas correlatas, é feita no Capítulo 4. No Capítulo 5 descreve-se a metodologia empregada, incluindo-se a descrição das ferramentas de processamento digital de imagens, usadas para o modelamento dos dados tomográficos. Apresenta-se, ainda, no Capítulo 5, a descrição de procedimentos automáticos desenvolvidos para a manipulação das imagens, desde a aquisição, no tomógrafo, até o tratamento final de análise estatística, reconstrução 3D, etc. No Capítulo 6, apresentam-se os resultados obtidos bem como as discussões pertinentes e, por fim, o Capítulo 7 traz as conclusões e recomendações resultantes e o Capítulo 8 as referências bibliográficas.

# Capítulo 2

# Filtros e processos de filtração

## 2.1 Introdução

A filtração é um processo muito antigo. Os princípios da filtração já estavam presentes desde os tempos mais remotos, quando o homem utilizava a areia para filtrar a água de rios para beber. Atualmente, a filtração é considerada um ramo da ciência altamente desenvolvida tecnologicamente, e em contínuo desenvolvimento.

Há uma freqüente confusão entre o que é um processo de *filtração* e um processo de *separação*. Neste trabalho, utilizar-se-á a definição de filtração como sendo um processo que consiste em remover partículas sólidas ou material gelatinoso de um fluido (líquido ou gás), usando-se um meio poroso (filtro). Geralmente, a filtração tem como objetivo final a obtenção de um determinado nível de pureza do fluido.

O processo de separação consiste em promover a divisão de uma ou mais substâncias, obtendo-se os componentes que deram origem à mistura. O processo de separação não tem como objetivo central a purificação de um determinado fluido. O dispositivo envolvido em um processo de filtração é sempre chamado de filtro, enquanto que em um processo de separação o dispositivo é denominado de acordo com o processo, por exemplo, coalescedor, separador por gravidade, etc.

O processo de filtração abrange um amplo espectro relativo aos tamanhos das partículas a serem retidas pelo filtro, que vai desde algumas dezenas de angstrons (Å) até a escala de milímetros. Em função dos tamanhos das partículas, o processo de filtração recebe alguns nomes

especiais. Quando se envolve partículas cujo tamanho varia aproximadamente de 10 μm a 1000 μm (1 mm), utiliza-se o termo genérico *filtração*. Denomina-se *microfiltração* quando se envolve partículas variando entre 0,1 μm a 10 μm. São partículas ou entidades do tipo bactéria, emácias sangüíneas, etc. Pode-se ter, ainda, a *ultrafiltração*, envolvendo-se partículas ou entidades do tipo vírus ou proteínas, cujo tamanho pode variar aproximadamente de 0,001 μm até 0,1 μm. Por fim, a *nanofiltração* e a *osmose reversa* são processos que envolvem partículas da ordem de alguns angstrons, como por exemplo, uma partícula iônica.

O processo de filtração também abrange um amplo espectro com relação ao tipo de aplicação. A preocupação com a preservação do meio ambiente tem tornado cada vez mais necessária a remoção de sólidos nocivos à natureza, de diversos tipos de efluentes e, de uma forma geral, o tratamento de resíduos industriais. Segundo CONANT AND HOGAN (1989), a indústria petrolífera dos Estados Unidos gera, por ano, 5,2 bilhões de galões de resíduos (emulsão de água, óleo e sólidos). Diante dessa grande quantidade de resíduos, as indústrias estão tendo que aperfeiçoar os processos de separação e filtração de forma a otimizar o tratamento desses resíduos. Alguns processos altamente avançados tecnologicamente, como por exemplo a nanofiltração, são empregados por certos setores da indústria, principalmente a indústria química (TREFFRY-GOATLEY, 1993). Outra importante aplicação é na área da lubrificação dos mais diversos tipos de componentes de motores máquinas em geral. É muito comum os óleos lubrificantes serem contaminados por vários tipos de partículas metálicas que, se não forem removidas, podem causar sérios danos às partes a serem lubrificadas, levando os componentes à falha (AHN, 1998).

## 2.2 Contaminantes

O contaminante é o material particulado presente em um determinado fluido. O contaminante é caracterizado em função de diversos parâmetros, que se relacionam diretamente com a maior ou menor eficiência de um filtro. O primeiro parâmetro importante a se considerar é o tamanho da partícula. O tamanho de uma partícula é referenciado utilizando-se a unidade μm (micrometro), que representa o diâmetro da mesma, ou para partículas não esféricas, que é o que ocorre na prática, representa o diâmetro equivalente. No campo geral de interesse dos processos

de filtração, o tamanho de uma partícula pode variar desde alguns décimos de μm (extra finas) até centenas de μm (grosseiras). São consideradas partículas finas aquelas com tamanho da ordem de 1 a 20 μm, e médias aquelas com tamanho da ordem de 20 a 50 μm. Existem ainda partículas de ordem de tamanho nanométrico, envolvidas em processo especiais de filtração e em outros interesses no campo da Física e Química, por exemplo.

A distribuição de tamanhos é um outro parâmetro relacionado às partículas, e pode ser representado de diversas formas. Umas delas é expressar a freqüência com que as partículas de um determinado tamanho (partículas em suspensão) ocorrem em um certo volume de fluido. O gráfico da Figura 2.1-a expressa o número de partículas, em função do tamanho, presentes em um ml de fluido totalmente saturado, desconsiderando a sedimentação. Pode-se ver que para partículas finas, até a ordem de 20 μm, tem-se uma proporcionalidade bastante definida entre o tamanho e a quantidade. O mesmo não acontece para partículas maiores, onde a quantidade decai mais rapidamente. Outra forma semelhante é a representação por classes de tamanho, conforme o gráfico da Figura 2.1-b, onde se nota um comportamento linear em toda a extensão da curva.

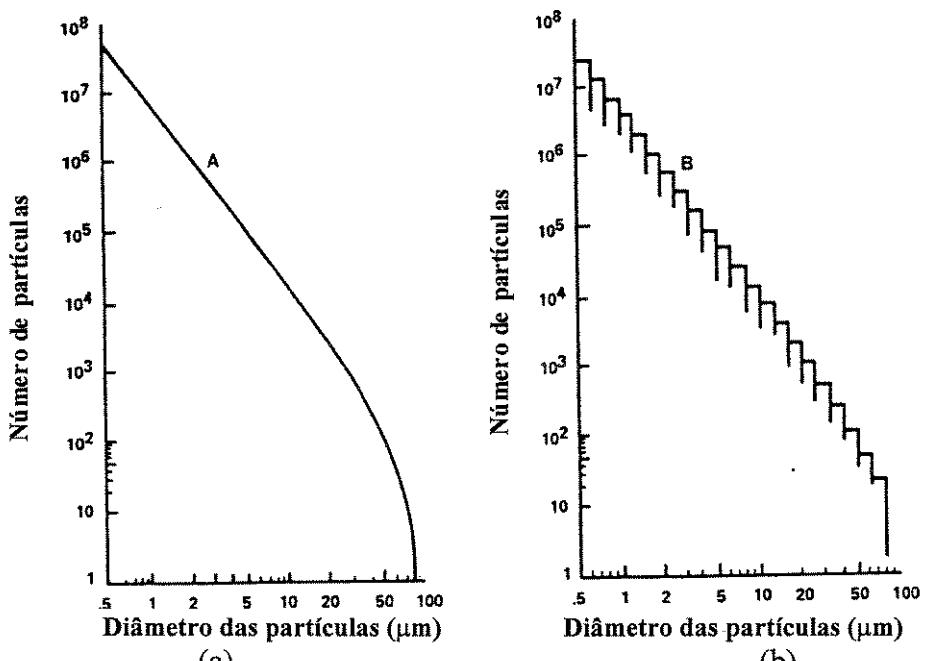



Figura 2.1 - Gráficos da distribuição de partículas (MELTZER, 1987)

Outro parâmetro importante é o tipo de partícula presente no fluido. Existe basicamente duas classes: contaminantes orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos são do tipo bactérias, fungos, vírus, etc. Os inorgânicos são do tipo pó de sílica, poeira, óxidos, pigmentos de tintas, etc.

A concentração é a quantidade de contaminante presente na massa de fluido a ser filtrada, independente do tamanho, forma, ou tipo. Também pode ser expressa em número de partículas por unidade de volume, massa de partículas por unidade de volume (g/l, por exemplo), porcentagem em volume de partículas em relação ao volume do fluido (% v/v) ou, ainda, porcentagem em peso de partículas em relação ao peso do fluido (% w/w).

Os contaminantes podem ser ainda do tipo artificial, usados nos ensaios de filtros. São ensaios utilizados com o intuito de verificar parâmetros de filtração, tais como mínimo tamanho de partícula que o filtro retém, quantidade de partículas de um determinado tamanho, etc. Existem diversos tipos de contaminantes artificiais, como por exemplo microesferas de vidro (ou *glass beads*), microesferas de látex (poliestireno), pó ISO ultrafino, entre outros. Na Figura 2.2, pode-se ver os aspectos dos diferentes contaminantes artificiais citados anteriormente.

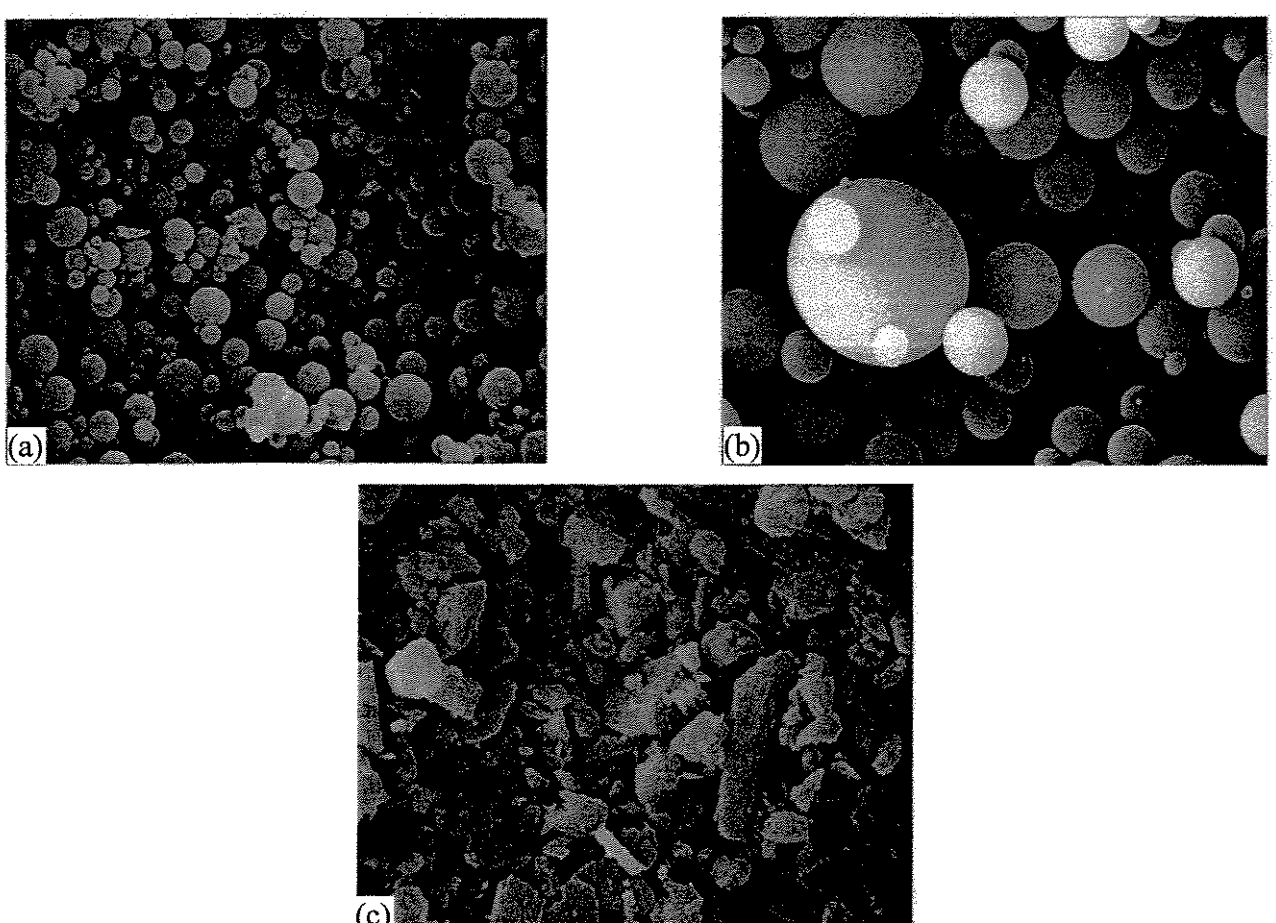



Figura 2.2 - Aspectos de diferentes tipos de contaminantes artificiais (VERDEGAN, 1997); (a) microesferas de vidro, (b) microesferas de látex, (c) pó ISO

## 2.3 Mecanismos de captura de partículas em meios porosos

Os processos de filtração envolvem diversos mecanismos de transporte e captura de partículas pela rede de poros que compõem o meio poroso (filtro). Esses mecanismos caracterizam-se por diferentes interações entre os poros e as partículas. Dependendo do tipo de meio poroso (filtros bobinados compostos por fibras de polipropileno ou algodão, por exemplo) a rede de poros pode sofrer alterações ou deformações no decorrer do processo de filtração, em função de uma alteração brusca de pressão, por exemplo, de tal forma que esta ultrapasse o limite especificado. Os principais mecanismos envolvidos são a *captura mecânica* e a *captura por adsorção*.

### *2.3.1 Captura mecânica*

A interceptação direta, pertencente à modalidade *captura mecânica*, é o mecanismo predominante em um processo de filtração de um líquido. Ocorre quando uma partícula se choca diretamente com uma fibra (ou um feixe de fibras), a qual representa uma barreira física à passagem das partículas (Figura 2.3). O maior ou menor grau de retenção depende das forças que agem no sentido de manter a partícula unida à fibra (forças atrativas) e de forças agindo no sentido de separá-las (forças repulsivas). Parâmetros tais como viscosidade do fluido, fluxo (vazão por unidade de área do filtro) e diferencial de pressão entre a entrada e a saída do meio filtrante influenciam essas forças. Aumentando-se esses parâmetros, há uma tendência em diminuir as forças atrativas e, por conseqüência, aumentar as forças repulsivas (SHUCOSKY, 1988).

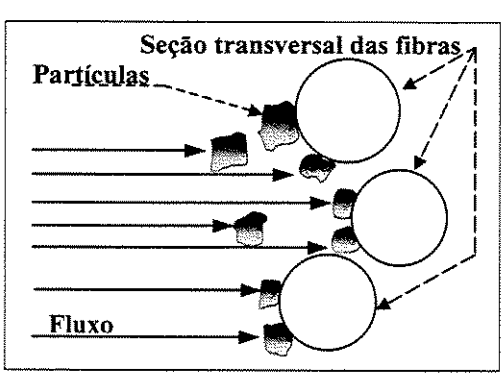



Figura 2.3 - Mecanismo de captura mecânica - interceptação direta

Ainda dentro da modalidade de captura mecânica, dois casos especiais podem ocorrer. O primeiro deles, conhecido como peneiramento, ocorre quando uma partícula, cujo tamanho é

maior do que o espaçamento entre duas fibras adjacentes, fica retida no espaço entre estas fibras (Figura 2.4-a). O segundo envolve, além da interação direta entre as fibras e as partículas, interação entre as próprias partículas. Duas ou mais partículas podem se interceptar no espaço entre duas fibras e, à medida que o processo se desenvolve, formam-se aglomerados que passam a funcionar como um filtro secundário às próximas partículas, constituindo o efeito ponte (Figura 2.4-b).

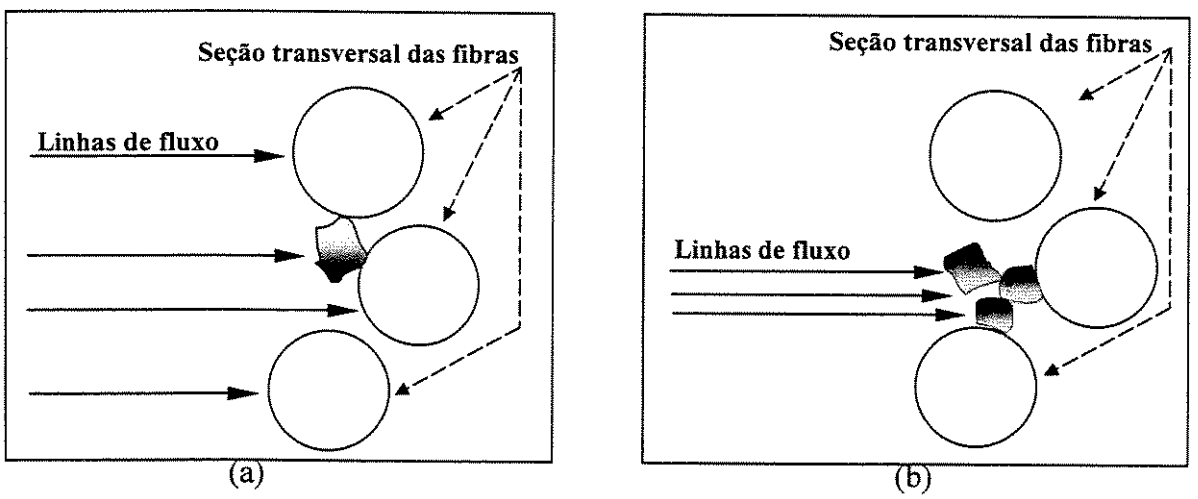



Figura 2.4 - Subcasos de captura mecânica; a) peneiramento e b) ponte

### *2.3.2 Captura por adsorção*

O processo de captura por adsorção ocorre quando uma partícula colide com a parede de um poro e adere à sua superfície (IMDAKM, 1991). Isto ocorre se o poro for maior do que a partícula (Figura 2.5).

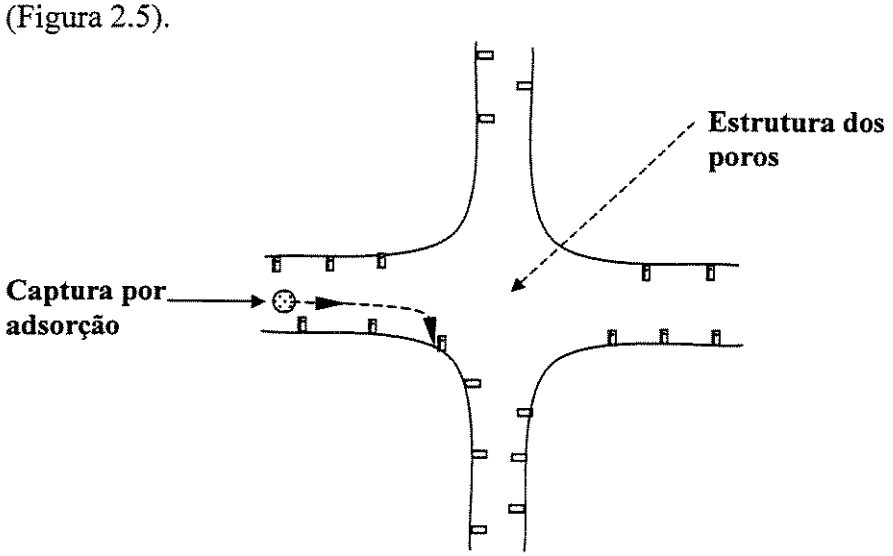



Figura 2.5 - Captura de partícula por adsorção

O mecanismo de adsorção pode ser influenciado por uma série de parâmetros, tais quais os descritos a seguir (RAISTRICK, 1986):

Viscosidade do fluido: diminuindo-se a viscosidade do fluido, o mecanismo de adsorção torna-se mais eficiente, ou seja, as forças de repulsão, que tenderiam a arrastar a partícula presa à parede do poro, ficam menores. Por outro lado, velocidades maiores arrastam as partículas mais rapidamente e diminui o tempo de permanência em um determinado poro, diminuindo, conseqüentemente, a probabilidade de uma partícula se chocar e aderir à sua parede.

Fluxo (vazão por unidade de área do filtro): reduzindo-se o fluxo também favorece-se o processo de adsorção, pois diminui-se a turbulência do fluido dentro da rede de poros. Isto pode ser feito aumentando-se a área do filtro ou, de forma equivalente, colocar filtros em paralelo na linha de filtração.

Diferença de pressão: o sistema de filtração deve ser dimensionado levando-se em conta a diferença de pressão entre a entrada e a saída do filtro, que não deve atingir valores altos, ou seja, muito acima daquela recomendada pelo fabricante. Quando essa pressão for atingida, recomenda-se a substituição do elemento. O valor típico para a classe de filtro tipo cartucho, principalmente os bobinados (constituídos de fibras), é de 35 psi.

## 2.4 Filtros tipo cartucho

Nesta seção, objetiva-se descrever os principais tipos de filtro do tipo cartucho, suas características, propriedades e particularidades.

### *2.4.1 Principais tipos e construção*

O desenvolvimento de novas técnicas, principalmente no controle do tamanho de poros, e o desenvolvimento de novos meios porosos tem tornado a aplicação dessa classe de filtros bastante versátil. Em filtros tipo cartucho, o fluido normalmente escoa perpendicularmente ao seu eixo longitudinal. Este tipo de elemento filtrante possibilita a remoção de partículas cujo tamanho pode variar da ordem de algumas dezenas de micrometros (μm) até a ordem de 100 micrometros,

podendo ser aplicados para fluidos com viscosidades superiores a 100.000 cP, em temperaturas superiores a $400^0$ C e em pressões superiores a 200 bar (SHUCOSKY, 1988). Essa versatilidade permite a aplicação desses filtros em diversos tipos de indústria, tais como a indústria farmacêutica, química, alimentícia, dentre outras. Um levantamento feito nos Estados Unidos apurou que, dos 8 bilhões de dólares movimentados em 1991, relativos a produtos e tecnologia ligados a filtros e processos de filtração, 25 % foram atribuídos aos filtros tipo cartucho (WILLIAMS AND EDYVEAN, 1995-a), o que comprova o grande volume de aplicação dessa classe de filtro.

Dependendo do tipo de aplicação, os filtros tipo cartucho podem desempenhar dois tipos básicos de função. Quando o objetivo é remover somente partículas de uma determinada classe de tamanho, o papel desempenhado é o da *classificação*. É o caso da aplicação em produtos tais como tintas, para se remover determinados pigmentos, ou produtos dos quais se deseja remover partículas maiores sem perda das partículas menores. Outro objetivo é remover partículas do menor tamanho possível, para se obter líquidos com um determinado nível de pureza, de acordo com a aplicação em questão. Nesse caso, o filtro desempenha o papel de *clarificação*, que não implica em uma remoção absoluta (SANDSTEDT AND WEISENBERGER, 1985). Num processo de clarificação, pelo menos as partículas maiores de 25 μm devem ser removidas com eficiência. Inclui-se a aplicação em produtos farmacêuticos (remédios e cosméticos, por exemplo), em produtos alimentícios (bebidas, por exemplo), etc.

Os filtros tipo cartucho podem ser divididos essencialmente em duas sub-classes: filtros de parede espessa e filtros de parede fina (NICKOLAUS, 1975). Os de parede espessa são construídos principalmente com fibras naturais ou fibras sintéticas (polipropileno, por exemplo), com diâmetro típico em torno de 20 μm a 50 μm, entrelaçadas para formar um feixe. Os feixes são bobinados convenientemente em volta de um suporte cilíndrico perfurado, que serve para dar sustentação mecânica aos feixes de fibras entrelaçadas. O tipo de fibra e a forma como os feixes são obtidos são importantes fatores na característica e na eficiência de filtração do elemento. Nos filtros de parede espessa, as partículas presentes no fluido penetram na parede do filtro e são capturadas pela rede de poros.

Os filtros cartucho de parede fina são obtidos a partir de um tecido poroso (membranas), normalmente à base celulose. Os mais comuns são do tipo plissado, onde o material é dobrado

convenientemente de forma a aumentar a área de contato com o fluido a ser filtrado, ou seja, aumentar a área útil de filtração. Nos filtros de parede fina, as partículas vão se acumulando na superfície do filtro, formando uma camada de material, também conhecida como torta ou reboco.

Os filtros cartucho podem se classificados também como descartáveis e não descartáveis. Os descartáveis são normalmente aqueles constituídos por fibras. Os não descartáveis são aqueles elaborados a partir de partículas metálicas, do tipo aço inoxidável, por exemplo, aglomeradas por processos de sinterização, ou elaborados a partir de alguns materiais cerâmicos. Os elementos não descartáveis são do tipo lavável, encontrados em aplicações mais nobres e são, evidentemente, mais caros. Dentro da classe dos descartáveis, os principais tipos são:

*Filtros bobinados*: Na construção dos filtros do tipo cartucho bobinados tem-se, inicialmente, um suporte cilíndrico perfurado para permitir a passagem do fluido. Dois conjuntos são montados em torno do suporte. Um deles é constituído por uma manta: algodão, polipropileno, etc. O segundo conjunto é constituído por feixes de fibras, do mesmo material da manta. A manta, juntamente com os feixes de fibras é enrolada em volta do suporte cilíndrico. Normalmente, os feixes são enrolados em espiral, intercalados com a manta, formando as camadas do filtro. Fatores tais como diâmetro das fibras, o passo com que os feixes são enrolados e a tensão imposta aos conjuntos (manta e feixe de fibras) ao serem enrolados, determinam o nível de compactação do material, determinando, por sua vez, o tamanho médio dos poros e a porosidade global do elemento. Estes são os chamados elementos mistos. Há também os elementos homogêneos, construídos a partir do enrolamento de feixes de fibras, somente.

*Resinado*: Outro tipo de elemento tipo cartucho bastante comum são aqueles formados por fibras que, juntamente com uma resina, do tipo epoxy, por exemplo, formam um amálgama que dá origem à matriz porosa. Primeiramente, mistura-se as fibras com a resina, e o conjunto é levado à etapa de pré-cura, sob determinada temperatura, a qual depende do tipo de resina empregada na fabricação do elemento. A mistura formada sob temperatura é, então, montada sob moldes, no formato do elemento filtrante. Um diferencial de pressão é aplicado no sentido da parte externa para a parte interna do molde, onde a massa de fibras e resina está disposta. O gradiente de pressão imposto tem como objetivo promover a formação da matriz de poros no interior da massa. O controle exercido sobre o gradiente de pressão permite a obtenção de um maior ou

menor nível de tamanho de poros, controlando-se assim a capacidade de retenção (μm) especificada. A etapa seguinte é a cura final, estando o elemento já próximo do formato final. Nesta etapa, o elemento é submetido a uma atmosfera de ar quente, a fim de adquirir consistência mecânica e, ao mesmo tempo, promover o processo de secagem. Em seguida, passa por um processo de torneamento para se chegar às dimensões físicas especificadas.

*Carbono ativado*: Os filtros do tipo carbono ativado apresentam basicamente duas funções combinadas, relacionadas à remoção de partículas e à remoção de odores da água, principalmente em aplicações domésticas. Diversas concepções (Figura 2.6) podem ser encontradas. A parte que retém partículas pode ser constituída por fibras, enquanto que a outra parte constitui-se de carbono ativado na forma granular. A parte 2.6-a e 2.6-b são exemplos de sistemas mistos, onde o fluido primeiro passa pela parte que captura partículas e, em seguida, passa pelo carbono para remoção de odores de cloro, por exemplo. A parte 2.6-c mostra um tipo conjugado, onde as funções de remoção de partículas e de odores podem ocorrer simultaneamente.

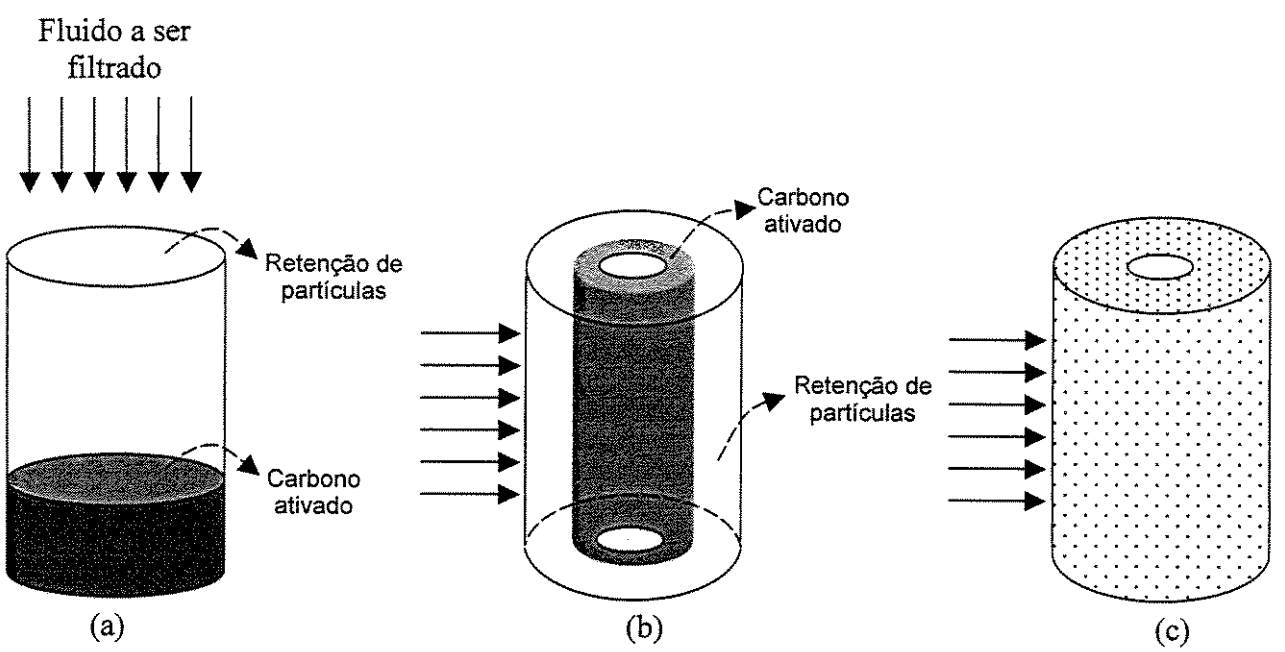



Figura 2.6 - Exemplos de filtros do tipo carbono ativado

*Plissados*: são construídos a partir de uma placa de celulose e alguns tipos de polímeros, dobradas e convenientemente montadas em torno de um cilindro. Uma das propriedades inerentes a este tipo de filtro é o aumento da área de contato entre o fluido a ser filtrado e a superfície do elemento filtrante.

Pertencentes à categoria dos filtros laváveis tem-se, principalmente:
*Aço inox*: são os mais comuns desta categoria. São constituídos por partículas metálicas de aço inoxidável e obtidos a partir do processo de sinterização. Uma das vantagens deste tipo de filtro é que não sofrem deformações consideráveis sob altas pressões de trabalho (LI, 1997). A obtenção da razão de filtração desejada está relacionada com o controle de parâmetros tais como o tamanho e o formato das partículas que formam o filtro e a temperatura e pressão de sinterização. A distribuição de poros depende da variabilidade do tamanho das partículas. Partículas com tamanho mais homogêneo tendem a formar poros com distribuição de tamanho mais homogêneo. A espessura destes filtros é da ordem de 2 mm a 3 mm.

*Filtros de malha metálica*: São semelhantes aos do tipo plissado, sendo porém, constituídos por uma malha metálica. Esta malha é formada pelo entrelaçamento de fios metálicos. O tamanho dos poros formados depende, portanto, do diâmetro desses fios e da distância entre eles.

Há ainda filtros especiais constituídos de materiais cerâmicos, os quais são apropriados para aplicações onde são envolvidas altas temperaturas (OHZAWA *et al.*, 1998; KANAOKA AND KISHIMA, 1999).

### *2.4.2 Eficiência e razão de filtração*

A maneira mais simples de se classificar um filtro tipo cartucho é fazendo-se referência ao tamanho da menor partícula que ele é capaz de reter. Assim, um filtro de 50 μm é aquele que captura partículas com um tamanho mínimo de 50 μm, que dá uma indicação do tamanho dos poros do filtro. Este valor é conhecido como razão absoluta do filtro e é uma especificação superficial, pois existem mecanismos envolvidos em um processo de filtração que permitem que uma partícula menor do que o tamanho do poro seja capturada, como é o caso da adsorção. Há que se considerar, também, as condições de operação do filtro (KUPERSCHMIDT, 1993 ; ROVERO AND ELIA, 1996). Assim, um filtro especificado como sendo de 50 μm, não necessariamente

deixa passar partículas abaixo de 50 μm. Por outro lado, a especificação de um filtro não deve ser feita somente pelo tamanho de partículas que ele consegue reter, mas também pela quantidade, dependendo de cada aplicação, implicando em dois importantes parâmetros que são a razão de filtração (ou razão β) e a eficiência de remoção (JOURDAN AND PEUCHOT, 1994; PEUCHOT, 1997). A razão de filtração é a razão entre o número de partículas antes do filtro ($I_x$) e o número de partículas após o filtro ($O_x$), conforme a Equação 2.1, onde o índice x indica que a razão de filtração é para um determinado tamanho de partícula:

$$\beta_x = \frac{I_x}{O_x} \tag{2.1}$$

Em termos de porcentagem, a eficiência ($E_x$) de um filtro é expressa conforme a Equação 2.2, a seguir:

$$E_x = \left(\frac{\beta_x - 1}{\beta_x}\right).100 \tag{2.2}$$

A tabela 2.1 mostra a relação entre alguns valores de $\beta_x$ e $E_x$.

Tabela 2.1 - Valores de $\beta_x$ e $E_x$

| $\beta_x$ | $E_x$ (%) |
|---|---|
| 2 | 50 |
| 10 | 90 |
| 100 | 99 |
| 1000 | 99,9 |
| 5000 | 99,98 |

Supõe-se que na entrada de um filtro passe um total de 10.000 partículas de 40 μm e na saída detecta-se 2 partículas. Neste caso, a razão $\beta_{40}$ do filtro é de 5.000 e a eficiência de filtração é de 99,98 %. Considerando-se que as mesmas 10.000 partículas tenham 30 μm e que se detecta na saída 1.000 partículas, a razão $\beta_{30}$ passa a ser 10 e a eficiência passa a ser 90 %. Portanto, um

determinado filtro pode ser 99,98 % eficiente ao remover partículas de 40 μm, 90 % eficiente ao remover partículas de 30 μm, 66 % eficiente ao remover partículas de 20 μm e assim por diante. Desta forma, dependendo da necessidade da aplicação, a especificação deste filtro poderia ser 40 μm, 30 μm ou 20 μm, se fosse utilizada somente a razão absoluta (SANDSTEDT AND WEISENBERGER, 1985). Na Figura 2.7 mostra-se uma curva característica da eficiência de um filtro tipo cartucho em função do tamanho de partículas, usando-se 200 ppm de ACCTD em água a 5 gpm. Percebe-se que para este filtro, a remoção é relativamente eficiente para partículas acima de 30 μm (90 %). Para partículas abaixo de 30 μm, a eficiência cai sensivelmente.

Determinadas aplicações, tais como em indústria farmacêutica, exigem filtros com alta eficiência para partículas extremamente pequenas (não raro muito abaixo de 1 μm). Para se conseguir esta eficiência utilizam-se elementos filtrantes construídos com fibras muito finas e com um bom controle do tamanho de poros.

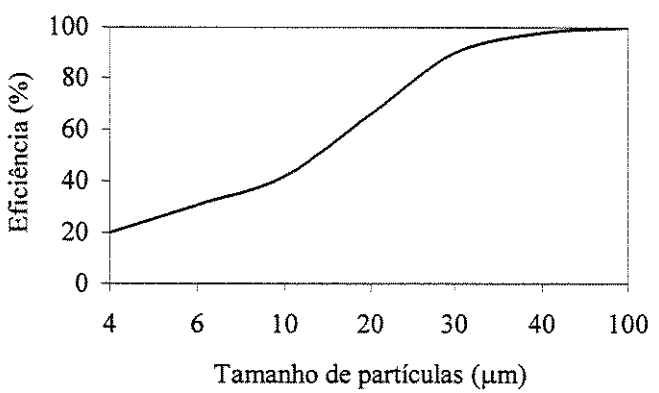



Figura 2.7 - Curva característica da eficiência de um filtro tipo cartucho em função do tamanho de partículas (Modificada de SANDSTEDT AND WEISENBERGER, 1985)

### *2.4.3 Ensaios não destrutivos*

Os ensaios não destrutivos são procedimentos utilizados para se avaliar a qualidade de um elemento filtrante. A inspeção visual, a medida das dimensões do elemento, massa e aparência geral também fazem parte dos procedimentos de avaliação da qualidade dos filtros.

Os ensaios pertencentes a essa classe são realizados principalmente pelos fabricantes e permitem que o filtro seja reutilizado. O objetivo desses testes é avaliar parâmetros tais como permeabilidade e tamanho de poros e, de uma forma geral, monitorar o controle do processo e a integridade dos filtros. Os principais ensaios não destrutivos são:

*2.4.3.1 Método da bolha*

Este teste baseia-se no fato de que, para um determinado fluido e para um determinado tamanho de poro, a pressão necessária para forçar uma bolha de ar através do poro é inversamente proporcional ao diâmetro do poro. Uma fina camada de um líquido com tensão superficial conhecida é aplicada sobre a superfície do elemento. Em seguida faz-se passar pelo elemento um fluxo de ar, cuja pressão é aumentada gradualmente. Quando precipitar a primeira bolha na superfície do filtro, mede-se a pressão correspondente do ar. Esta pressão indica o máximo tamanho de poro existente. A correlação entre a pressão medida e o máximo tamanho de poro é feita pela Equação 2.3, conhecida como equação de Poiseuille, como segue:

$$p = \frac{4\kappa^* \sigma_L \cos\Theta}{D_{máx}} \tag{2.3}$$

onde:

p = pressão correspondente ao aparecimento da primeira bolha;

$\sigma_L$ = tensão superficial do líquido usado;

água: $\sigma_L$ = 0,072 N/m (72 dinas/cm)

isopropanol: $\sigma_L$ = 0,0213 N/m (21,3 dinas/cm)

freon: $\sigma_L$ = 0,019 N/m (19 dinas/cm)

$\Theta$ = ângulo de molhabilidade;

$D_{máx}$ = Diâmetro máximo de poro;

$\kappa^*$ = fator de correção que depende do tipo de filtro, se granular ou constituído por fibras.

A Equação 2.3 indica que, para um dado líquido e tamanho de poro, a pressão requerida para forçar a bolha através do poro é inversamente proporcional ao diâmetro máximo de poro.

*2.4.3.2 Permeabilidade ao ar*

Este teste é semelhante ao método da bolha, à medida que também se faz passar um fluxo de ar pelo filtro. A diferença é que, neste, o objetivo é medir a permeabilidade do elemento, baseado na maior ou menor resistência oferecida à passagem do ar, e, indiretamente, medir a porosidade global do filtro. A medida da permeabilidade de um meio poroso consiste em medir a

vazão volumétrica (Q) de um fluido em função da diferença de pressão (ΔP) provocada pelo meio, sendo este caracterizado por uma área transversal (A) e uma espessura ($e_M$). Isto é relacionado quantitativamente pela Equação 2.4, na qual μ é a viscosidade do líquido, T a tortuosidade e ϕ a porosidade:

$$(\overline{D})^2 = \frac{32.Q.\mu.e_M.T}{\Delta p.A.\phi} \qquad (2.4)$$

sendo $\overline{D}$ o diâmetro médio de poro.

WILLIAMS (1992) apresenta uma relação entre a porosidade do filtro e a pressão (em polegadas de água) para um filtro tipo cartucho bobinado e constituído por fibras de polipropileno. Esta relação está mostrada na tabela 2.2. Os dados desta tabela mostram claramente que, quanto menor porosidade do elemento, maior a pressão, ou seja, maior a resistência oferecida à passagem do fluido.

Tabela 2.2 - Relação entre porosidade e pressão resultante de um teste de permeabilidade ao ar

| Porosidade (μm) | Teste de permeabilidade ao ar: faixa de valores de pressão (Pa) |
|---|---|
| 100 | 50 – 124 |
| 75 | 50 – 174 |
| 50 | 62 – 199 |
| 30 | 99 – 298 |
| 25 | 199 – 498 |
| 10 | 373 – 996 |
| 5 | 498 – 1244 |
| 3 | 622 – 1742 |
| 1 | 871 – 3732 |

Algumas relações mais empíricas são sugeridas por alguns autores, no sentido de se determinar o diâmetro de poros. SANDSTEDT AND WEISENBERGER (1985) apresentam esta relação (Equação 2.5) para um filtro fibroso, onde se n=1, D é o diâmetro máximo e, se n=2, D é o diâmetro médio:

$$D = \frac{D_F}{n(1-\phi)}\left[\frac{e_F(1-\phi)}{0{,}00026D_F + 0{,}0017}\right]^{-0{,}24} \qquad (2.5)$$

Ainda em relação a filtro de fibra, JAPUNTICH *et al.* (1997) apresenta outra relação para o tamanho de poros do filtro, neste caso sendo diâmetro médio:

$$\overline{D} = D_F\left[\left(\frac{2\alpha}{\pi}\right)^{-1/2} - 1\right] \tag{2.6}$$

MELTZER (1987) apresenta uma relação para filtro granular, conforme a Equação 2.7 :

$$(\overline{D})^2 = \frac{16\phi^2}{S^2(1-\phi)^2} \tag{2.7}$$

### *2.4.4 Ensaios destrutivos*

Os ensaios destrutivos normalmente são realizados em laboratórios para se avaliar a eficiência e a capacidade de retenção do filtro, bem como a vida do elemento filtrante. Recebem esse nome porque os filtros testados não são reutilizados. Nestes ensaios, um fluido teste (normalmente água) com uma determinada concentração de partículas de um contaminante artificial, com distribuição de tamanhos conhecida, é conduzido através do filtro, sob determinadas condições. O filtro pode ser instalado em um circuito fechado (*multi-pass*), sendo que neste caso o fluido pode ser recirculado; ou em um circuito aberto (*single-pass*), onde o fluido não é recirculado pelo filtro.

Alguns parâmetros devem se levados em conta ao se realizar um teste de contaminação artificial:

*Tipo de contaminante*: o tipo de contaminante depende do tipo de filtro. Para filtros utilizados em aplicações farmacêuticas, por exemplo, utilizam-se colônias de bactérias numa concentração de $10^6/cm^3$, da espécie *Pseudomonas diminuta*, cujo tamanho é da ordem de 0,3 μm. Para estas aplicações, a razão β do filtro deve ser bastante alta, da ordem de 5000 ou mais, o que significa uma eficiência de remoção superior a 99,98 % para partículas abaixo de 1 μm. Para outras aplicações pode-se usar, ainda, microesferas de vidro, ACFTD ou ACCTD.

*Vazão do fluido*: flutuações bruscas na vazão afetam o diferencial de pressão entre a entrada e a saída do filtro, podendo comprometer sua capacidade de retenção. Vazões muito altas também interferem nos mecanismos de filtração, como se discutiu na seção 2.2.

*Temperatura do fluido*: uma temperatura adequada (geralmente ambiente) deve ser mantida constante, para evitar variações na viscosidade do fluido, o que também interfere nos mecanismos de filtração.

*Pressão do sistema*: pressões muito altas afetam sensivelmente a vida do elemento filtrante. Grandes variações também podem danificar o elemento (pressão dinâmica), principalmente aqueles do tipo bobinado (constituídos por fibras, de algodão ou fibras sintéticas) que são relativamente flexíveis e podem sofrer deformações. Pode ocorrer, ainda, liberação de sólido já capturado pelo filtro (WILLIAMS, 1992; WILLIAMS AND EDYVEAN, 1995-b).

Os ensaios não destrutivos são aqueles realizados corriqueiramente pelo fabricante. São ensaios relativamente simples e baratos. No entanto, oferecem dados estimados sobre os parâmetros medidos, ou seja, porosidade global, permeabilidade e capacidade de retenção dos elementos filtrantes. Dados mais aproximados da realidade são aqueles obtidos por meio dos ensaios destrutivos que, porém, são mais dispendiosos e trabalhosos. Nos ensaios destrutivos, amostras de filtros são coletadas e submetidas ao teste. Primeiramente, obtêm-se curvas de vazão volumétrica *versus* queda de pressão com o filtro limpo e, em seguida, realiza-se o teste propriamente dito. Em função do monitoramento das partículas injetadas no filtro e das partículas que o atravessam, tem-se a capacidade de retenção do elemento, que é correlacionada com a queda de pressão medida. Com isto, monta-se uma tabela com a capacidade de retenção em função da permeabilidade do filtro. Esta tabela serve de guia para os ensaios corriqueiros (os não destrutivos) realizados na linha de produção.

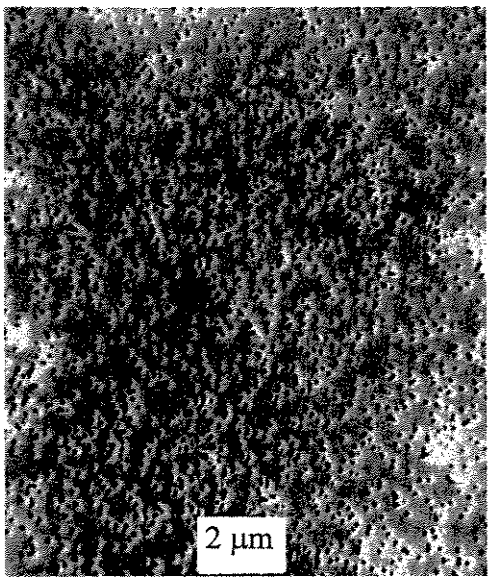
## 2.5 Filtração por superfície (filtros do tipo membrana)

O tamanho das partículas a serem filtradas, o tipo de filtro utilizado, com relação à sua geometria e material empregado na sua construção, por exemplo, bem como a interação entre as partículas e a estrutura do filtro, são os principais parâmetros que caracterizam um determinado tipo de filtração.

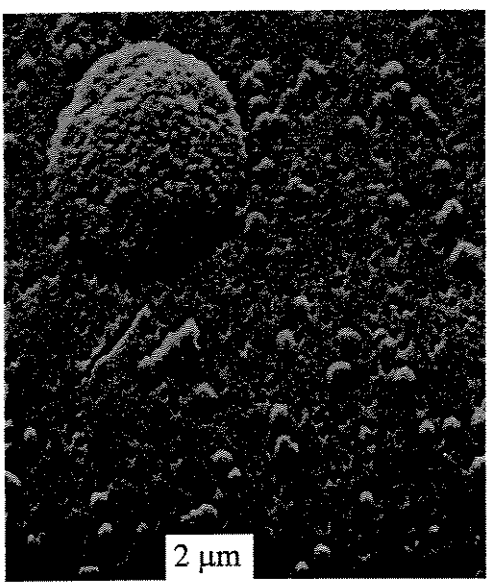
Um filtro tipo membrana caracteriza-se geometricamente por ser de pequena espessura, sendo, desta forma, o tipo de filtro que representa uma filtração por superfície. A filtração do tipo superfície é caracterizada pela formação de uma camada de partículas (ou camada sólida), conhecida como torta (do inglês, *cake*) que vai se formando na superfície porosa (filtro), no decorrer do processo de filtração.

O tipo de torta depende da natureza do sólido, da granulometria, da forma das partículas e do modo como a filtração é conduzida. Basicamente, a torta formada com o acúmulo do sólido pode ser compressível ou incompressível. A torta é compressível quando a resistência oferecida ao escoamento do filtrado aumenta com o aumento da pressão. Pode se fazer uma analogia com uma esponja que, quando pressionada, oferece maior resistência ao escoamento de um fluido pelo seu interior, pois os poros são obstruídos ou diminuem de tamanho, ou seja, a porosidade média da torta diminui ao longo do processo de filtração. Por outro lado, a torta é incompressível quando a resistência oferecida ao escoamento é aproximadamente constante. A porosidade média da torta incompressível também se mantém constante ao longo do processo de filtração (HARVEY AND BRIDGER, 1988).

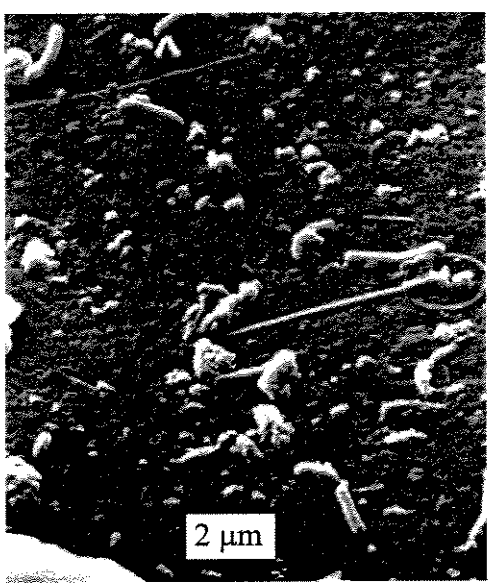
Na Figura 2.8-a, pode-se ver o aspecto de um filtro tipo membrana limpo. A Figura 2.8-b mostra o aspecto de um filtro tipo membrana com um determinado nível de contaminação. Pode-se ver uma partícula bem maior do que os poros do filtro. Nota-se que esta partícula está ligeiramente deformada, o que leva à formação de uma torta compressível. A Figura 2.8-c também mostra um filtro tipo membrana contaminado, porém com partículas menores e, aparentemente não deformadas.




(a)




(b)




(c)

Figura 2.8 - Aspectos de um filtro tipo membrana: a) limpo, b) e c) contaminados

A filtração por superfície é uma categoria bastante importante e é amplamente usada em vários processos industriais. Filtros do tipo membrana podem ser usados, por exemplo, no tratamento de emulsões água-óleo (OHYA *et al.*, 1998). Membranas podem ser usadas em um tipo de filtração onde o fluxo é paralelo à superfície do filtro (*crossflow microfiltration*). Esta categoria apresenta aplicações importantes tais como na biotecnologia, para a produção de macromoléculas do tipo proteínas e antibióticos (JIRARATANANON *et al.*, 1998), retenção de óxidos e hidróxidos metálicos de efluentes industriais, purificação de fluidos na indústria de

componentes eletrônicos e retenção de partículas radioativas presentes na água usada para resfriamento em usinas nucleares (WANG *et al.*, 1995; ALTMANN AND RIPPENGER, 1997 e CUMMING *et al.*, 1999).

Diversos autores (RISBUD, 1981; HARVEY AND BRIDGER, 1988; BIERCK *et al.*, 1988; STAMATAKIS, 1991 e STAMATAKIS, 1993) apresentam trabalhos mostrando a preocupação em estudar o mecanismo de formação da camada sólida no processo de filtração por superfície. As propriedades de interesse nesse tipo de filtração são a variação do gradiente de pressão, da distribuição da porosidade e da resistência oferecida ao fluido em função da deposição da camada sólida (torta), o volume do filtrado, a massa e a espessura da torta. HARVEY AND BRIDGER (1988) e TILLER *et al.* (1989) apresentam estudos onde descrevem equações, válidas para tortas incompressíveis ou moderadamente compressíveis.

De acordo com HARVEY AND BRIDGER (1988) e TILLER *et al.* (1989), a massa de torta por unidade de área é dada pela Equação 2.8:

$$m_t = \frac{\rho.s.v}{1-\frac{s}{s_t}} \tag{2.8}$$

A porosidade média da torta é dada pelas equações 2.9 e 2.10, apresentadas a seguir:

$$\phi_{av} = 1 - \frac{m_t}{\rho_s e_F} = \frac{\sigma_{SL}(1-s_t)}{\sigma_{SL}(1-s_t)+s_t} \tag{2.9}$$

Manipulando-se as equações 2.8 e 2.9 chega-se à forma apresentada pela Equação 2.10, a seguir:

$$\phi_{av} = \frac{\sigma_{SL}\cdot(1-s)}{\sigma_{SL}\cdot(1-s)+s} - \frac{s}{\sigma_{SL}\cdot(1-s)+s}\cdot\frac{v}{e_F} \tag{2.10}$$

Para tortas incompressíveis, o quociente $v/e_F$, na Equação 2.10, mantém-se constante ao longo do processo de filtração, ou seja, $d^2v/d(e_F)^2 = 0$. Para tortas compressíveis, para as quais a porosidade diminui com o aumento de pressão, o quociente $v/e_F$ tende a aumentar, ou seja: $d^2v/d(e_F)^2 > 0$.

A lei de Darcy é muito empregada nas modelagens dos processos de filtração. Uma de suas utilizações (HARVEY AND BRIDGER, 1988) objetiva definir o gradiente de pressão hidráulica [dp($e_F$)/dx] atuante na camada sólida, na forma descrita pela Equação 2.11, a seguir:

$$\frac{dp_L}{dx} = -\frac{dp_S}{dx} = \frac{\mu.u}{k} \tag{2.11}$$

A Equação 2.11 também pode ser escrita na forma de coordenadas de massa:

$$\frac{dp_L}{dm} = -\frac{dp_S}{dm} = \mu.u.R_{LT} \tag{2.12}$$

Na Equação 2.12, o gradiente de pressão é dado em função da variação de massa, em vez da variação dimensional, representada por x, na Equação 2.11.

A porosidade local ($\phi_L$) e a resistência local da torta ($R_{LT}$) relacionam-se de acordo com a equação de Carman-Kozeny (Equação 2.13) descrita como segue:

$$R_{LT} = \frac{1}{\rho_S} k(S_0)^2 \frac{(1-\phi_L)}{\phi_L{}^3} \tag{2.13}$$

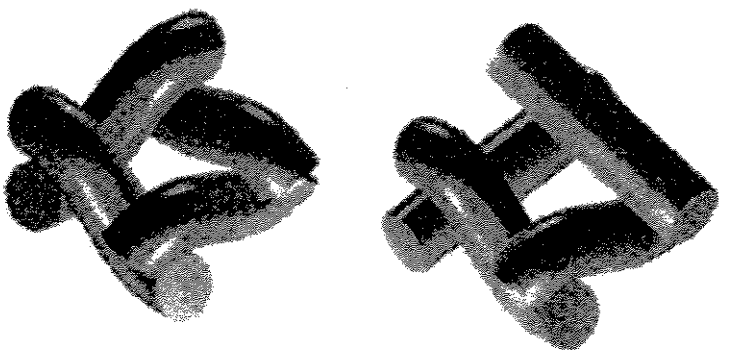
Integrando a Equação 2.13 sobre a espessura da torta, obtém-se a Equação 2.14:

$$\frac{p}{\mu.u} = \phi_{av} m_t + R_m \tag{2.14}$$

Em boa parte dos casos, a filtração por superfície resulta em uma torta compressível. O efeito de compressibilidade ocorre devido a características viscoelásticas das partículas a serem filtradas, que são comuns em produtos da indústria de alimentos e da indústria química, por exemplo.

### *2.5.1 Características do processo*

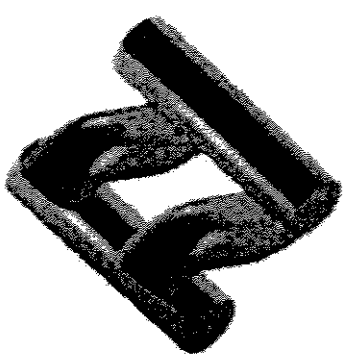
Diferentes formas de entrelaçamento das fibras que compõe o filtro levam à obtenção de vários modelos de poros. Na Figura 2.9, apresentam-se quatro modelos de poros, dentre os quais o do tipo 1 apresenta maior nível de tortuosidade e o do tipo 4 apresenta o menor nível.



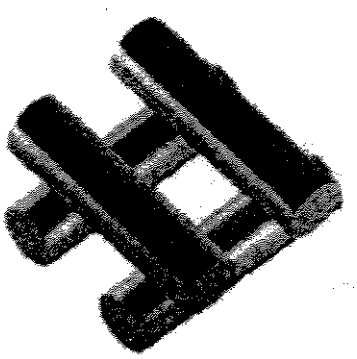
(a) Poro tipo 1



(b) Poro tipo 2



(c) Poro tipo 3



(d) Poro tipo 4

Figura 2.9 - Exemplos de modelos de poros formados por diferentes formas de entrelaçamento das fibras na construção de um filtro fibroso (LU *et al.*, 1997)

O processo de filtração através desse tipo de meio filtrante (filtros de superfície) compreende basicamente dois tipos de comportamento relativos ao sólido retido. Primeiramente, as partículas tendem a bloquear (ou saturar) os poros do filtro e, em seguida, as partículas podem formar aglomerados ou camadas de partículas. De uma forma ou de outra, o depósito de partículas no filtro tende a aumentar a sua resistência à passagem do fluido.

Em sistemas onde há partículas cujo tamanho é consideravelmente heterogêneo, no início da filtração pode ocorrer um acúmulo de partículas que passam a funcionar como um filtro secundário às próximas partículas, esquematizado na Figura 2.10-b.

Quando a concentração de sólido no fluido a ser filtrado é relativamente baixa, mesmo havendo heterogeneidade das partículas, a tendência é que não haja a formação de aglomerados, ou torta (Figura 2.10-a), pois há relativamente pouca interação entre o conjunto de partículas. Para se configurar uma torta, é necessária pelo menos uma concentração de 30 % v/v (volume de partículas/volume de fluido). Este seria um valor limiar que definiria a frente de ataque entre fluido e torta (TARLETON, 1998; TARLETON AND HANCOCK, 1996).

(a) (b)

Figura 2.10 - Formas de acúmulo de partículas em uma filtração de superfície

*2.5.1.1 Forças atuantes*

Considerando-se uma partícula esférica e incompressível, arrastada por um fluido e movimentando-se por entre a estrutura porosa considerada, atuam sobre esta partícula a força de arraste ($F_d$), devido à ação do escoamento, a força devido à ação da gravidade ($F_g$) e forças decorrentes do atrito entre partículas ($F_a$). Este conjunto de forças está mostrado na Figura 2.11, que também mostra a direção do fluxo em relação à posição do filtro.

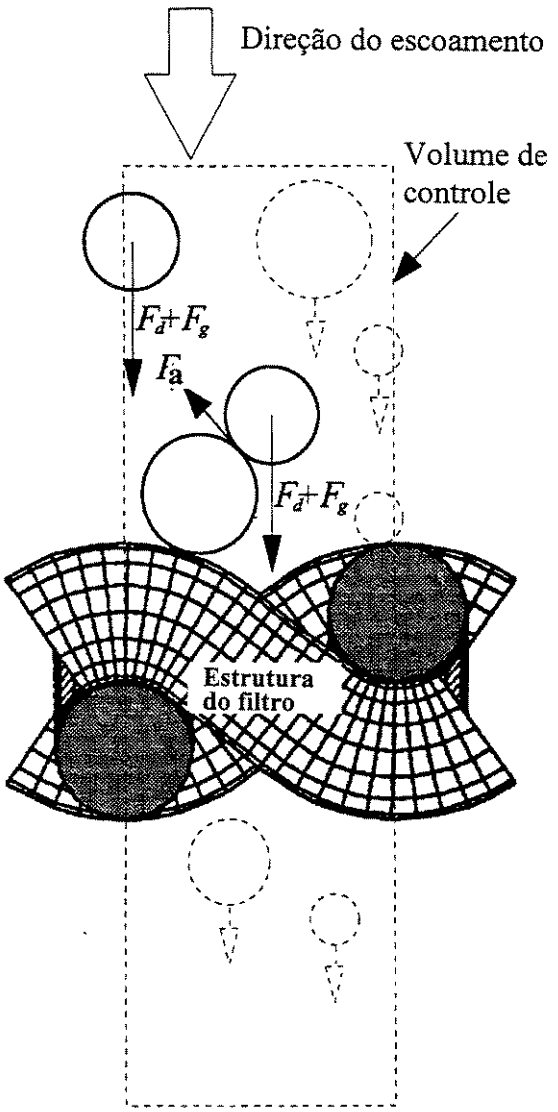



Figura 2.11 - Diagrama esquemático das forças atuantes sobre partículas na filtração por superfície (LU *et al.*, 1997)

Para descrever as forças atuantes sobre as partículas, são feitas várias considerações, tais como:

a) as partículas são esféricas e rígidas;

b) a concentração de sólido é de ordem tal que as interações hidrodinâmicas entre as partículas possam ser desprezadas;

c) Admite-se que as partículas sejam maiores do que 1 μm, significando que o movimento de Brown possa ser desprezado.

*2.5.1.2 Força de Arraste*

No decorrer da filtração, pode-se identificar três estágios pelos quais uma partícula passa: o trajeto por entre as linhas de fluxo até atingir o meio poroso, a acomodação na camada sólida (se esta se formar) e movimentos migratórios dentro da camada sólida. A força de arraste sobre a partícula no trajeto por entre as linhas de fluxo pode ser estimada pela Equação 2.15, que é uma forma modificada da lei de Stoke:

$$F_d = 3\pi\mu D_P (u - u_P) F_C \tag{2.15}$$

onde $\mu$ é a viscosidade do fluido, $D_P$ é o diâmetro da partícula, u é a velocidade do fluido, $u_P$ é a velocidade da partícula e $F_C$ é um fator de correção, dado por:

$$F_C = 1{,}90\left(\frac{h_C}{D_P}\right)^{-0{,}625} \tag{2.16}$$

onde $h_C$ é a distância entre a partícula e a camada sólida.

Para as partículas acomodadas na camada sólida ou em migração em seu interior, tem-se que:

$$F_d = -4\pi\mu.u.\frac{\left(\frac{D_P}{2}\right).\left(3 + 2\gamma^5\right)}{2 - 3\gamma + 3\gamma^5 - 2\gamma^6} \tag{2.17}$$

onde:

$\gamma = \sqrt[3]{1-\phi}$ e

$\phi$ = porosidade do filtro.

*2.5.1.3 Força da gravidade*

A força da gravidade é avaliada por:

$$F_g = \frac{1}{6}\pi(\rho_p - \rho_f)D_P^3.g \qquad (2.18)$$

onde $\rho_p$ e $\rho_f$ são as massas específicas da partícula e do fluido, respectivamente, e g a aceleração da gravidade.

*2.5.1.4 Resistência*

A resistência do filtro pode ser dividida em três partes, sendo a primeira devida ao filtro limpo ($R_L$), a segunda, devida aos poros bloqueados ($R_b$), que se caracteriza em uma região onde ainda não se formou a camada sólida e, a terceira ($R_c$), devida à formação da camada sólida. A resistência devida ao filtro limpo é, normalmente, um parâmetro fornecido pelo fabricante. A resistência devido aos poros bloqueados é calculada levando-se em conta um modelo, segundo o qual, o filtro é dividido em multicamadas, conforme a Equação 2.19:

$$R_b = \frac{R_L}{n_C}\sum_i^{n_C}\left(\frac{\phi_{L,i}}{\phi_{b,i}} - 1\right) \qquad (2.19)$$

onde $\phi_{L,i}$ é a porosidade da i-ésima camada do filtro limpo, $\phi_{b,i}$ é a porosidade da i-ésima camada do filtro com poros bloqueados e $n_C$ o número de camadas consideradas.

A resistência devido à camada sólida é calculada pela equação de Kozeny, levando-se em conta que esta camada seja divida em sub-camadas (Equação 2.20):

$$R_c = \sum_j \frac{Y_j.D_p.(1-\phi_j)^2}{\phi_j^3}\left(\frac{6}{D_P}\right)^2 \qquad (2.20)$$

onde j é o número de sub-camadas e $Y_j$ é dado em função da porosidade da j-ésima camada ($\phi_j$), conforme a Equação 2.21:

$$Y_j = \frac{2\phi_j^3}{(1-\phi_j)\left\{\ln\left[\frac{1}{(1-\phi_j)}\right] - \frac{[1-(1-\phi_j)^2]}{[1+(1-\phi_j)^2]}\right\}} \qquad (2.21)$$

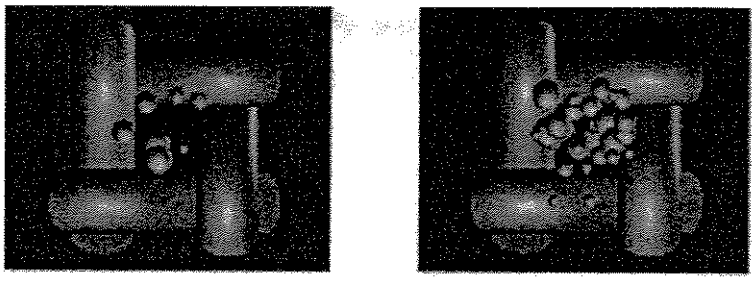
A resistência total ($R_T$), que é a soma das três resistências ($R_L + R_b + R_c$), relaciona-se com a diferença de pressão sobre o filtro ($\Delta P$), da seguinte forma:

$$\Delta p = u_\infty . \mu . R_T \qquad (2.22)$$

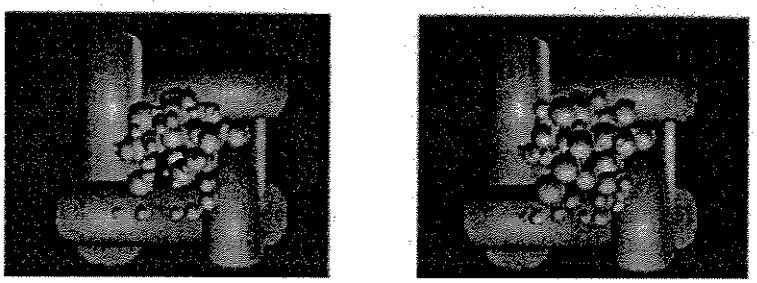
ou seja, Equação 2.22 mostra claramente que o aumento da resistência do filtro devido ao processo de obstrução dos poros, ou devido à formação da torta, faz aumentar o diferencial de pressão no filtro. Também, segundo a Equação 2.22, quanto maior a viscosidade do fluido, maior o $\Delta p$.

*2.5.1.5 Efeito da estrutura dos poros no processo de captura de partículas*

LU *et al.* (1997) apresentam quatro tipos básicos de estrutura de poros e, por meio de simulações numéricas, demonstram e comparam o processo de bloqueio dos poros pelas partículas. Na Figura 2.12 são apresentados os quatro estágios de saturação de um poro do tipo 1 (mostrado na Figura 2.9-a). O autor encontrou, para as condições simuladas, que o tempo decorrido para o bloqueio deste tipo de poro foi de 2,23 segundos. Para os poros do tipo 2, 3 e 4 (também mostrados na Figura 2.9), os tempos de bloqueio encontrados foram, respectivamente, de 3,33 segundos, 3,40 segundos e 5,91 segundos. Percebe-se que o menor tempo decorrido até a saturação está associado ao poro do tipo 1, o que é atribuído ao fato deste modelo de poro apresentar maior tortuosidade e, conseqüentemente, maior tendência de capturar uma determinada partícula. O poro do tipo 4, de menor tortuosidade, apresenta maior tempo para a saturação (5,91 segundos).



(a) t = 0,10 s (b) t = 0,52 s



(a) t = 1,82 s (b) t = 2,23 s

Figura 2.12 - Estágios de saturação de um determinado tipo de poro (LU *et al.* 1997)

*2.5.1.6 Efeito da concentração de sólidos no processo de bloqueio dos poros*

O processo de retenção de partículas pelos poros está intimamente ligado à concentração de sólidos no fluido a ser filtrado. LU *et al.* (1997) encontraram, por meio de várias simulações, relações entre a concentração de sólido ($C_o$) e a eficiência com que os diferentes tipos de poros eram bloqueados. Para concentrações baixas, essa eficiência era relativamente pequena, resultando em um tempo maior para se obter um determinado nível de clarificação do fluido. Os autores também explicam que para soluções diluídas (baixa concentração de sólido), há a tendência de um maior fluxo de fluido, gerando sobre uma determinada partícula maior força de arraste, fazendo, com isso, que o estágio de aprisionamento da partícula se torne instável, dificultando a formação de uma estrutura de partículas que serviriam de obstáculos para as próximas partículas. Por outro lado, para altas concentrações, um maior número de partículas tende a promover mais rapidamente aglomerados que aumentam os obstáculos às próximas partículas. Um valor crítico para a concentração ($C_c$) seria um nível abaixo do qual não haveria a formação da torta, devido ao fato das partículas atingirem a estrutura dos poros individualmente. Com relação ao tipo de poro, LU *et al.* (1997) concluem que o maior $C_c$ está relacionado ao poro do tipo 4, mostrado anteriormente, por apresentar menor capacidade para formar aglomerados necessitando, desta forma, de um maior número de partículas para se desenvolverem os aglomerados.

*2.5.1.7 Efeito da relação entre o tamanho dos poros do filtro e o tamanho das partículas*

Na filtração por superfície, a relação entre o tamanho das partículas e o tamanho dos poros tem uma influência direta no tempo decorrido para que haja obstrução do filtro. Como resultado de suas simulações, LU *et al.* (1997) demonstraram que para partículas com diâmetro médio de 35 μm (desvio-padrão de 5 μm) o tempo de obstrução e, conseqüentemente, a formação da torta de filtração, é aproximadamente 30 vezes menor do que no caso onde se tem partículas com diâmetro médio de 10 μm (com o mesmo desvio-padrão de 5 μm). A concentração crítica para o caso das partículas menores (0,1512 % em volume) é cerca de 50 vezes maior do que para o caso das partículas maiores (0,0030 % em volume), ou seja, com partículas maiores, há a formação da torta de filtração com uma concentração bem menor. Estas constatações são feitas em relação ao filtro do tipo 1 (poro do tipo 1).

*2.5.1.8 Efeito da estrutura dos poros na resistência do filtro e na concentração crítica*

Com relação à estrutura do filtro, o poro do tipo 1 é o que causa a maior resistência à passagem do fluido, enquanto que o poro do tipo 4 oferece uma resistência cerca de 50 % menor do que o tipo 1. Para verificar a influência do tipo de poros na concentração crítica, LU *et al.* (1997) compararam os dados resultantes dos quatro tipos de poros, usando partículas esféricas com diâmetro médio de 15 μm (desvio-padrão de 5 μm). O poro do tipo 1 foi o que apresentou a menor concentração crítica (0,065 % em volume), seguido pelos poros do tipo 2 (0,078 % em volume) e 3 (0,082 % em volume). O poro do tipo 4 foi o que apresentou a maior concentração crítica (0,126 % em volume).

Desenvolvendo um trabalho experimental, RAMARAO (1989), chegou a conclusões semelhantes a LU *et al.* (1997), principalmente com relação à estrutura formada pelas partículas nos poros do filtro. Utilizando microscopia eletrônica de varredura para analisar a superfície do filtro, RAMARAO verificou que as partículas tendiam a formar estruturas dendríticas, semelhantes às estruturas mostradas na Figura 2.12. A formação de aglomerados também foi estudada por SCHAAFSMA *et al.* (1998) e CASTIER *et al.* (1998), porém, utilizando técnicas de simulação.

## 2.6 Filtração em profundidade

A filtração em profundidade caracteriza-se, basicamente, pelo fato da partícula percorrer uma determinada distância em relação à superfície do filtro. Difere basicamente do processo de filtração por superfície por haver a penetração de partículas no interior da rede de poros do filtro. Os filtros espessos, do tipo cartucho, por exemplo, são construídos basicamente por uma estrutura tridimensional de poros formada pelo entrelaçamento de fibras (ou feixes de fibras), com diâmetro típico entre 20 μm e 50 μm, ou ainda por fibras picadas ou por material granular. O processo de filtração em profundidade caracteriza-se, ainda, pela retenção de quantidades maiores de contaminantes.

Porém, a diferença entre um processo de filtração por superfície e um processo de filtração em profundidade não reside somente nas dimensões físicas do elemento filtrante envolvido em cada um desses processos. Um parâmetro mais realístico para a comparação entre os dois processos é o tamanho da partícula a ser retida em relação às dimensões do filtro, bem como seu trajeto em relação à estrutura do filtro. Considere-se, inicialmente, um filtro de superfície com uma espessura de 100 μm, e uma partícula incidente de 20 μm. Neste caso, o tamanho da partícula e a espessura do filtro são da mesma ordem de grandeza. Considerando, por outro lado, uma partícula de 0,2 μm, a diferença entre as dimensões do filtro e da partícula é bem mais expressiva. Desta forma, o elemento pode se comportar como filtro do tipo superfície no primeiro caso (partículas de 20 μm), ou se comportar como filtro de profundidade no segundo caso (partículas de 0,2 μm), uma vez que estas últimas podem realizar um determinado trajeto no interior de filtro, maior do que o trajeto que poderia ser realizado pelas partículas de 20 μm, cuja tendência é serem retidas na superfície, por efeito de peneiramento. Na Figura 2.13, esquematiza-se um caso de filtração em profundidade.

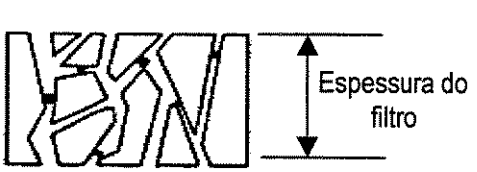



Figura 2.13 - Representação da filtração em profundidade

O processo de filtração em profundidade (ou filtro de profundidade) pode ser caracterizado em função do nível de acúmulo de contaminantes ao longo de sua espessura. LI AND PARK (1999) apresenta uma relação matemática descrevendo a taxa de remoção global em função da posição (z) na direção do escoamento. Esta relação é mostrada na Equação 2.23:

$$C_0(z) = C_{in} e^{-\lambda z} \tag{2.23}$$

onde: $C_0(z)$ é a concentração média de partículas no fluido, na posição z;

$C_{in}$ é concentração inicial de partícula no fluido;

$\lambda$ caracteriza o coeficiente de filtração do meio filtrante.

LÜCKE AND FISSAN (1996) trata o coeficiente de filtração como uma função do diâmetro da partícula ($D_P$), que por sua vez é o parâmetro de uma função, $P(D_P)$, que define a probabilidade da partícula ser capturada, conforme a Equação 2.24:

$$\lambda(D_P) = -\frac{\ln P(D_P)}{e_F} \tag{2.24}$$

WALSH (1996) apresenta uma expressão para a probabilidade ($P_n$) de uma determinada partícula ser capturada, em função de vários parâmetros relativos à estrutura do filtro, apresentada na Equação 2.25:

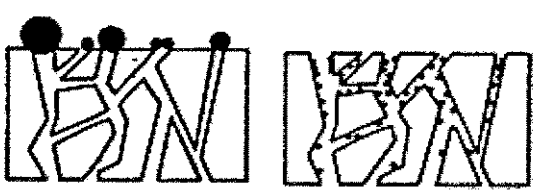
$$P_n = \exp\left(\frac{4\alpha e_F \eta_F}{\pi D_F \xi}\right) \tag{2.25}$$

## 2.7 Filtração por adsorção

Viu-se no item anterior que, na filtração tipo superfície, o principal mecanismo envolvido é caracterizado por uma espécie de peneiramento. As partículas, maiores do que os poros do filtro, ficam retidas na superfície. A filtração por *adsorção* caracteriza-se pela penetração das partículas pelo interior do filtro que, agora, não são mais do tipo membrana. São filtros que tem uma concepção geométrica diferente de uma superfície. Na Figura 2.14 ilustra-se uma comparação

entre o processo de filtração por superfície (parte a) e uma filtração caracterizada predominantemente pelo processo de adsorção (parte b). Uma das vantagens diretas da filtração por adsorção é que não são necessários filtros com poros menores que o tamanho das partículas a serem filtradas. Na Figura 2.15, mostra-se o aspecto de uma porção de um filtro fibroso com várias partículas aderidas à fibra.

Em determinadas aplicações, como a filtração de óleos lubrificantes contaminados com partículas metálicas, o processo de adsorção pode ser influenciado pelo tipo de material usado na construção do filtro. AHN (1998) e PINCHUK (1995) mostraram que a eficiência de um filtro, construído com fibras poliméricas (poliamida-nylon 6,6), aumenta significativamente quando se utilizam fibras ativadas magneticamente. WALSH AND STENHOUSE (1997-a) e WALSH AND STENHOUSE (1997-b) também apresentaram estudos sobre a influência da modificação das propriedades das fibras modificadas eletricamente, verificando, de forma geral, um aumento da eficiência do filtro. Outros estudos também se propuseram a avaliar efeitos físico-químicos (PINHEIRO, *et al.*, 1999) e efeitos elétricos (SOLT, 1993) em processos de captura de partículas.



(a) (b)

Figura 2.14 - Comparação entre a filtração por superfície e o processo de filtração por adsorção

Figura 2.15 - Densidade de partículas aderidas à fibra de um filtro (filtração por adsorção)

## 2.8 Filtros do tipo leito granular

No processo de filtração por leito granular normalmente utiliza-se escoamento por gravidade e o meio filtrante é constituído, via de regra, por partículas de sílica, ou microesferas de vidro, cujo diâmetro médio varia entre 0,5 mm e 1,5 mm. Neste tipo de filtração, a velocidade superficial típica está em torno de 0,5 mm/s a 2,0 mm/s (PAYATAKES, 1981) e são comumente usados no tratamento de efluentes e esgotos (BOLLER *et al.* 1997).

Um dos fatores que influenciam a eficiência deste processo é a distribuição do tamanho das partículas que compõem o meio filtrante (KAMINSKI *et al.*, 1997; TIEHM, *et al.*,1999). KAMINSKI *et al.* (1997) analisaram várias configurações de filtros com relação ao tamanho das partículas, entre 1,1 mm e 1,5 mm, denominando as amostras de "filtro de 1.1 mm", "filtro de 1,5 mm" e assim por diante. Em geral, houve a constatação de que leitos constituídos por partículas menores apresentavam melhor capacidade de remoção para partículas contaminantes menores, porém, esta capacidade dependia da velocidade (ou razão) de filtração. Por exemplo, a uma alta razão de filtração (20 m/h), o filtro de 1,5 mm apresentou uma capacidade de remoção 20 % superior ao filtro de 1.1 mm, para um *range* de contaminantes entre 5 μm e 10 μm.

Outro fator que exerce influência na capacidade de remoção destes filtros é a concentração de partículas no efluente a ser filtrado. PRASANTHI *et al.* (1997) avaliaram o efeito da concentração de partículas de látex monodispersas com tamanho de 0,46 μm e 0,825 μm, em um meio filtrante constituído por microesferas de vidro com diâmetro médio de 0,175 mm, e uma razão de filtração de 5 m/h. Um dos objetivos era avaliar a dinâmica do processo ao longo do tempo. Uma das constatações foi que para concentrações extremamente baixas (0,0747 mg/l e 0,8667 mg/l), para ambos os tamanhos de partículas analisados, a taxa de remoção (razão entre a concentração inicial e a concentração final) manteve-se praticamente constante. Porém, para concentrações maiores, esta taxa aumentou a longo do tempo, sugerindo que a aderência de um maior número de partículas nos grãos melhora a sua eficiência.

Porém, para partículas polidispersas, MACKIE AND BAI (1993) encontraram resultados diferentes daqueles encontrados por PRASANTHI *et al.* (1997). Usando um pó de PVC, com tamanhos entre 0,5 μm e 15 μm, constataram que a taxa de remoção diminuía com o tempo.

Os grãos de areia ou as microesferas de vidro que compõem os filtros do tipo leito convencionais são impermeáveis. GIMBEL AND NAHRSTEDT (1997) usaram um material permeável na construção de um filtro do tipo leito. O material era um tipo de plástico poroso (poliuretana reticulada, nome comercial PORET) em forma de pequenas fibras no formato cilíndrico. Comparando com os filtros convencionais, a constatação foi que o filtro analisado reteve uma maior quantidade de contaminantes e, ainda, verificou-se uma menor queda de pressão no filtro.

# Capítulo 3

# Modelamento matemático e simulação numérica

## 3.1 Introdução

A importância de um modelo numérico é a possibilidade de se obterem parâmetros que auxiliem nas etapas de um determinado projeto. Muitos são os fatores (ou parâmetros) envolvidos no comportamento (ou eficiência) de um filtro e a reprodução destes parâmetros em laboratório é, geralmente, bastante dispendiosa. As variáveis envolvidas relacionam-se com as características microestruturais do filtro, tais como diâmetro de fibras (no caso de um filtro de fibras), porosidade, etc, bem como com as propriedades externas ao filtro, tais como tipo de fluido, tipo de material sólido a ser retido (massa específica e tamanho de partículas, por exemplo), pressão do fluido, etc. O modelo numérico desenvolvido neste trabalho tem como objetivo básico a simulação numérica de processos de filtração com vistas a entender a sua dinâmica em função dos diversos parâmetros envolvidos.

Alguns autores têm mostrado interesse no estudo de processos de filtração utilizando modelos matemáticos e simulação numérica. TILLER AND HSYUNG (1993) e TILLER *et al.* (1996) utilizaram equações fenomenológicas baseadas na lei de Darcy para estudar processos de formação de torta em filtros cilíndricos. Meios filtrantes constituídos por fibras têm sido outro objeto de estudo. SCHWEERS *et al.* (1994), por exemplo, apresentam um modelo interessante, onde levam em conta diversos parâmetros relativos à heterogeneidade do filtro, tais como variação da permeabilidade em função da distribuição, posicionamento e diâmetro das fibras. VENGIMALLA *et al.* (1999) também utilizaram meios constituídos por fibras, analisando,

inclusive, a compressibilidade do meio, através da teoria do contínuo. Meios constituídos por fibras também foram objetos de estudo de LEBEDEV AND KIRSH (1995) e LANGE *et al.* (1999). Ficam bem claras as preocupações com os aspectos estruturais do filtro em si, porém, não deixam claro como esses parâmetros poderiam variar, com o tempo, em função do processo de filtração. SCHMIDT (1996) também apresenta resultados de simulação numérica, avaliando características, como por exemplo, espessura, porosidade, na camada depositada em filtros do tipo superfície. DHANIYALA AND LIU (1998) apresentou um modelo para caracterizar o escoamento em um meio filtrante constituído por fibras, levando em conta o efeito da distribuição espacial das fibras. O modelo diz respeito somente à estrutura do filtro, não considerando o processo de filtração em si, ou seja, o efeito do acúmulo de contaminantes.

TOBIASON *et al.* (1994), VIGNESWARAN AND TULACHAN (1988) apresentaram modelos usados para simular processos de filtração em meios granulares, verificando a influência do diâmetro de partículas monodispersas no comportamento da queda de pressão no filtro. REGE AND FOGLER (1987) também seguem uma linha semelhante, considerando o efeito de partículas polidispersas. Ainda com relação a filtros granulares, ou particulados, outros autores têm apresentado modelos com base em equações de balanço de massa, pela qual é avaliado o decaimento da concentração de partículas ao longo do domínio físico filtro e ao longo do tempo (BROWN AND WAKE, 1999; PUTNAM AND BURNS, 1997; OSMAK *et al.*, 1997).

REGE AND FOGLER (1987) utilizaram um modelo de rede para simular o processo de obstrução de meios porosos pela passagem de um fluido particulado. Para a construção do modelo, os autores seguiram a analogia feita com fotomicrografias de amostra de um meio poroso do tipo rocha (denominado *Berea sandstone*). Na Figura 3.1, mostra-se a estratégia utilizada para se compor o modelo de rede. Na parte (a), aparece a representação do meio poroso, mostrando-se os espaços porosos e as ligações (gargantas) entre os poros. Na parte (b), aparece a representação em rede do poro em destaque.

Uma das limitações deste tipo de modelo é que a representação de uma amostra com dimensões significativas requer elevado custo computacional. O fato é que estes modelos representam o meio poroso em escala micrométrica, ou seja, na escala do tamanho dos poros. Portanto, supondo-se um modelo tridimensional, para representar uma amostra cúbica de um meio poroso da ordem de 1 mm de aresta, com tamanho de poros da ordem de 30 μm, seria

necessária uma rede de 30x30x30, totalizando 27000 elementos. O modelo ainda é restrito a um tipo específico de meio poroso, do tipo rocha. De qualquer forma, estes modelos representam uma boa ferramenta para a predição do fenômeno de obstrução de um meio poroso.

É possível prever a queda de permeabilidade em função da injeção de fluidos com diferentes tipos de partículas, monodispersas ou polidispersas, etc. REGE AND FOGLER (1987) demonstraram, por exemplo, que a queda de permeabilidade ocorrida quando o fluido contém partículas monodispersas é bem diferente da que ocorre quando o fluido contém partículas polidispersas, que é o caso mais próximo da realidade. Quando se têm partículas monodispersas, a taxa de redução da permeabilidade vai caindo até um determinado tempo, após o que permanece constante. Porém, não é isto que acontece para o caso onde se têm partículas polidispersas, para o qual se verifica uma contínua redução, até atingir valores críticos, próximos de zero. Através da Figura 3.2, verificam-se alguns resultados encontrados pelos autores, que levaram em conta o efeito do tamanho de partículas polidispersas com relação à distribuição de tamanho de poros. Mostra-se que quanto maior a área de sobreposição da curva de distribuição de partículas sobre a curva de distribuição do tamanho de poros, mais rápida é a queda da permeabilidade.

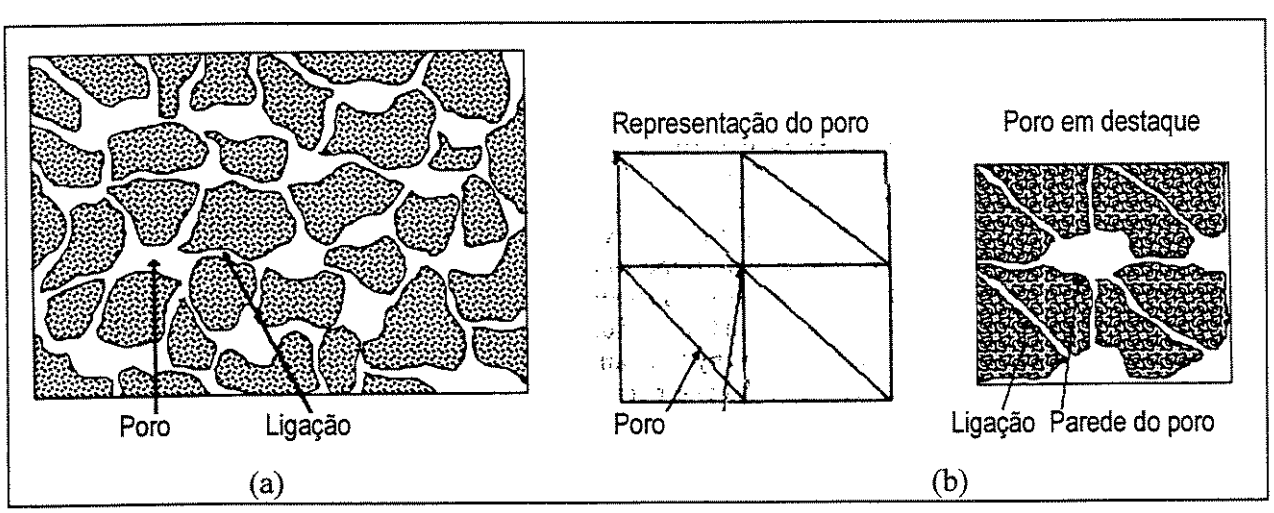



Figura 3.1 - Modelo de poros apresentado por REGE AND FOGLER (1987)

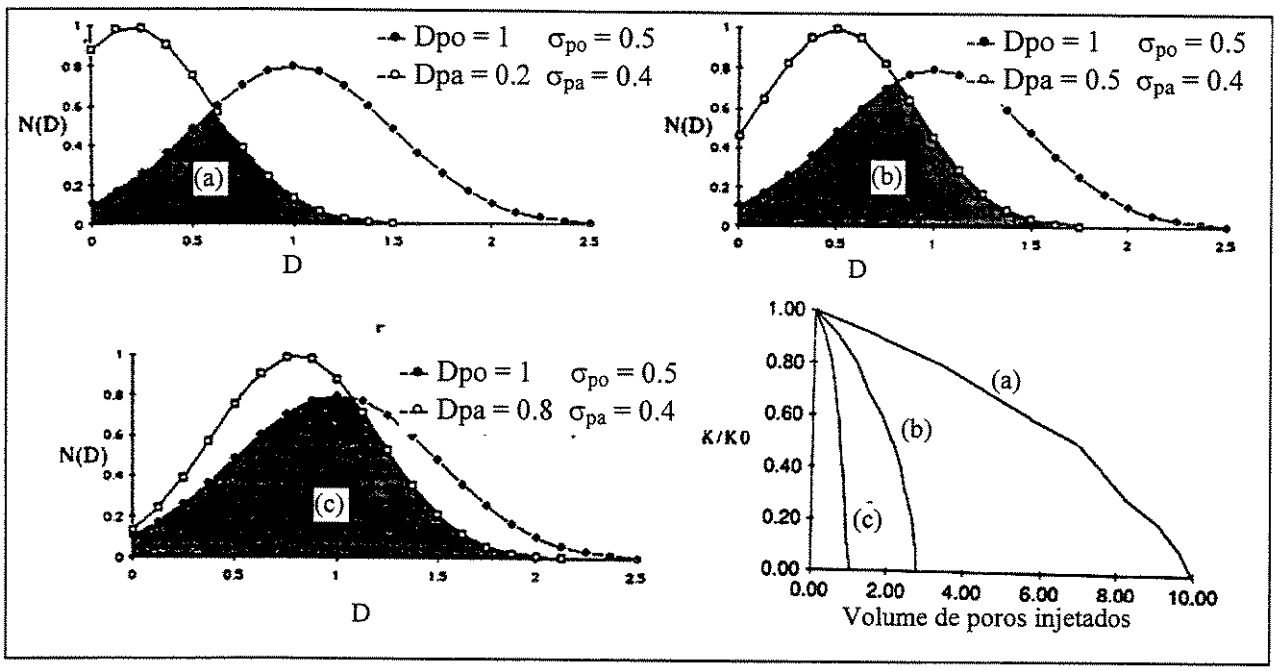



Figura 3.2 - Redução de permeabilidade no modelo de REGE AND FOGLER (1987)

## 3.2 Definição do problema

Uma das propostas deste trabalho é considerar a variação da permeabilidade do filtro em função do acúmulo de partículas entre as fibras. Os espaços vazios são alterados dinamicamente devido à deposição de partículas. Com isso, considera-se a variação da porosidade e da permeabilidade ao longo do processo de filtração. Ou seja, as propriedades do meio poroso variam não só em função da sua geometria microestrutural (SCHWEERS AND LÖFLER, 1994), como também ao longo do processo dinâmico de acúmulo de partículas.

Em suma, o desenvolvimento do modelo é feito analisando-se duas categorias de parâmetros: a primeira, relacionada ao escoamento, e a segunda, relacionada à estrutura do filtro e ao aspecto microestrutural do processo de filtração.

Trata-se da análise do processo de filtração em filtros cilíndricos, nos quais o fluido a ser filtrado entra pela parede externa e sai pela parede interna sendo, portanto, um escoamento radial, conforme mostrado na Figura 3.3.

O fluido é contaminado com partículas sólidas a uma determinada concentração inicial. Devido a esta concentração ser relativamente baixa (da ordem 1 de grama por litro) e levando-se em conta uma escala macroscópica, considera-se o escoamento como sendo monofásico.

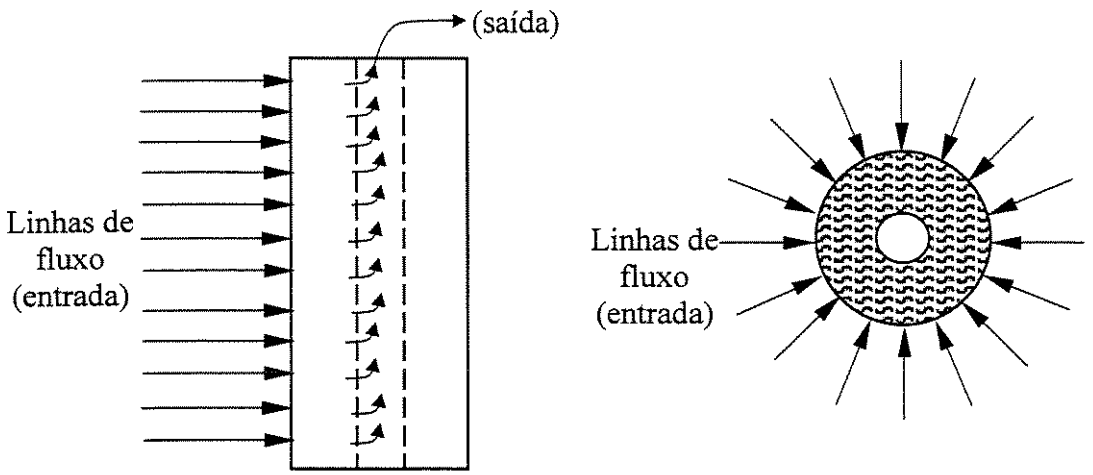



Figura 3.3 - Representação esquemática das linhas de fluxo na entrada e saída do filtro

## 3.3 Escoamento

Uma das formas de se definir o escoamento em um meio poroso é por meio da combinação da equação de conservação de massa (também conhecida como equação da continuidade) com a lei de Darcy (ALEXANDER AND CHENG, 1984; VAFAI AND KIM, 1995; LEE AND YANG, 1997), que é a equação de movimento de um fluido em meios porosos.

Para o escoamento de um fluido incompressível, ou seja, cuja massa específica ($\rho$) não varia com o tempo, a equação da continuidade é escrita da seguinte forma:

$$-\nabla \bullet \rho \mathbf{u} = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \tilde{q} \tag{3.1}$$

A lei de Darcy, na forma diferencial e considerando-se o termo devido à aceleração da gravidade, é apresentada na Equação 3.2, como segue:

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu}(\nabla p - \rho g \nabla z) \tag{3.2}$$

Combinando-se as equações (3.1) e (3.2), obtém-se a equação geral (3.3) que rege o escoamento de um fluido (escoamento monofásico) em um meio poroso:

$$\nabla \bullet \left[ \frac{\rho k}{\mu}(\nabla p - \rho g \nabla z) \right] = \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \tilde{q} \tag{3.3}$$

Neste trabalho, o problema estudado é caracterizado geometricamente por um formato cilíndrico (filtros cilíndricos). Considerando-se, portanto, um sistema de coordenadas cilíndricas, de acordo com a Figura 3.4, onde as variáveis relacionadas ao escoamento e às propriedades do filtro variam em r, z e t (tempo) a Equação 3.3 pode ser desenvolvida de forma a se obter a seguinte equação:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left( r\rho(p)\frac{k_r(r,z)}{\mu(p)}\frac{\partial p}{\partial r}(r,z,t)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left( \rho(p)\frac{k_z(r,z)}{\mu(p)}\left(\frac{\partial p}{\partial z}(r,z,t) - \rho(p)g\right)\right) - \tilde{q}(r,z,t) = \rho(p)c\phi(r,z)\frac{\partial p}{\partial t}(r,z,t) \tag{3.4}$$

O fluido utilizado é a água e, portanto, para o problema tratado neste trabalho pode-se considerar um fluido incompressível. Outra observação é que a viscosidade do fluido em questão também não sofre variação considerável. Substituindo-se $\rho(p)$ por $\rho$ (constante), $\mu(p)$ por $\mu$ (constante) e considerando-se que não há redução de massa devido à compressibilidade do fluido ($\tilde{q}(r,z,t) = 0$), a Equação 3.4 pode ser rescrita, obtendo-se a Equação 3.5 (JACOVKIS *et al.*, 1999):

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left( r k_r(r,z)\frac{\partial p}{\partial r}(r,z,t)\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left( k_z(r,z)\left(\frac{\partial p}{\partial z}(r,z,t) - \rho g\right)\right) = \mu c\phi(r,z)\frac{\partial p}{\partial t}(r,z,t) \tag{3.5}$$

A Equação 3.5 é a base para o cálculo da pressão em cada elemento do filtro. Após a pressão ter sido calculada, utiliza-se a equação de Darcy para o cálculo da velocidade em cada elemento.

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

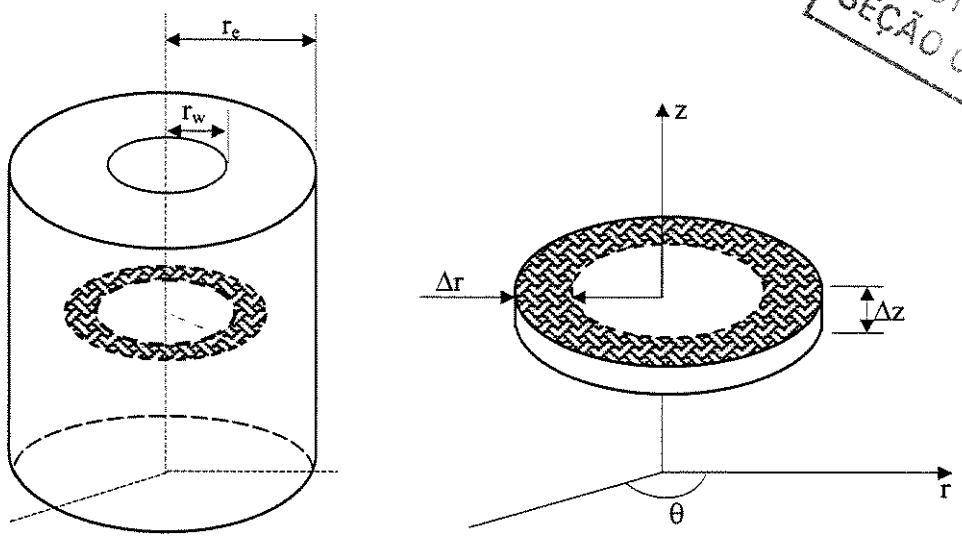



Figura 3.4 - Esquema de coordenadas cilíndricas para a definição das equações

## 3.4 Modelamento da estrutura do filtro

A estrutura de um filtro, constituído por fibras ou granular, é caracterizada pela distribuição aleatória de poros. Funções matemáticas são utilizadas a fim de se modelar essa distribuição. Uma das funções estatísticas normalmente utilizada para esse fim é a função gama (JOHNSTON, 1999), descrita como segue:

$$f(D) = \left[\frac{\beta^{\sigma}}{\Gamma(\sigma)}\right] D^{\sigma-1} e^{-\beta D} \qquad (3.6)$$

onde $\Gamma(\sigma) = (\sigma\text{-}1)!$

Na Equação 3.6, D representa o diâmetro dos poros, $\beta$ é um parâmetro relacionado à densidade de empacotamento do filtro (filtro constituído por fibras), ou ao tamanho das partículas que compõem o meio poroso, no caso de filtro granular. O parâmetro $\sigma$ relaciona-se com o formato da distribuição. Deve-se lembrar, ainda, que ($0! = 1$), ou seja, condição em que $\sigma = 1$.

A fim de se representar a distribuição de poros em duas dimensões no espaço, usa-se uma matriz de quarta ordem, do tipo f[i][j][l][k], na qual os dois primeiros índices ("i" e "j") relacionam-se às coordenadas espaciais do filtro, o terceiro índice ("l") relaciona-se ao tamanho dos poros e, o quarto índice (k), relaciona-se à distribuição percentual de poros de cada elemento localizado em posições definidas pelas coordenadas "i" e "j".

Nas Figuras 3.5 e 3.6 apresentam-se duas configurações de filtros, onde se variam os parâmetros $\sigma$ e $\beta$, da Equação 3.6. Nestes gráficos mostra-se a variação da densidade de empacotamento (no eixo x), a variação do tamanho de poros (no eixo y) e, no eixo z, mostra-se a distribuição de poros. A distribuição de poros está em porcentagem, e a densidade de empacotamento aparece normalizada, em escala de 0 (densidade mínima) a 1 (densidade máxima). Pode-se ver que a densidade de empacotamento aumenta da periferia para as regiões internas do filtro. Pode-se ver, também, que poros de diâmetros menores, e em maior quantidade, estão presentes nas regiões mais internas (mais densas) e poros de diâmetros maiores, e em menor quantidade, estão presentes nas regiões mais externas (menos densas).

A diferença entre os casos mostrados nas Figuras 3.5 e 3.6 é basicamente o formato da distribuição de poros. O modelo da Figura 3.5 caracteriza-se por um pico de concentração de poros cujos diâmetros estão em torno de 10 μm a 15 μm. O caso da Figura 3.6 mostra uma situação onde é menor a incidência de poros de menores diâmetros, ou seja, a distribuição é caracterizada pela presença de poros com maiores diâmetros, onde o pico de concentração ocorre para poros de diâmetros em torno de 20 μm a 30 μm. Este tipo de modelamento é no sentido de se reproduzir o que acontece na prática, de acordo com alguns fabricantes, segundo os quais, poros maiores na periferia retêm partículas maiores e as partículas menores seriam retidas pelos poros menores, nas partes mais internas dos filtros.

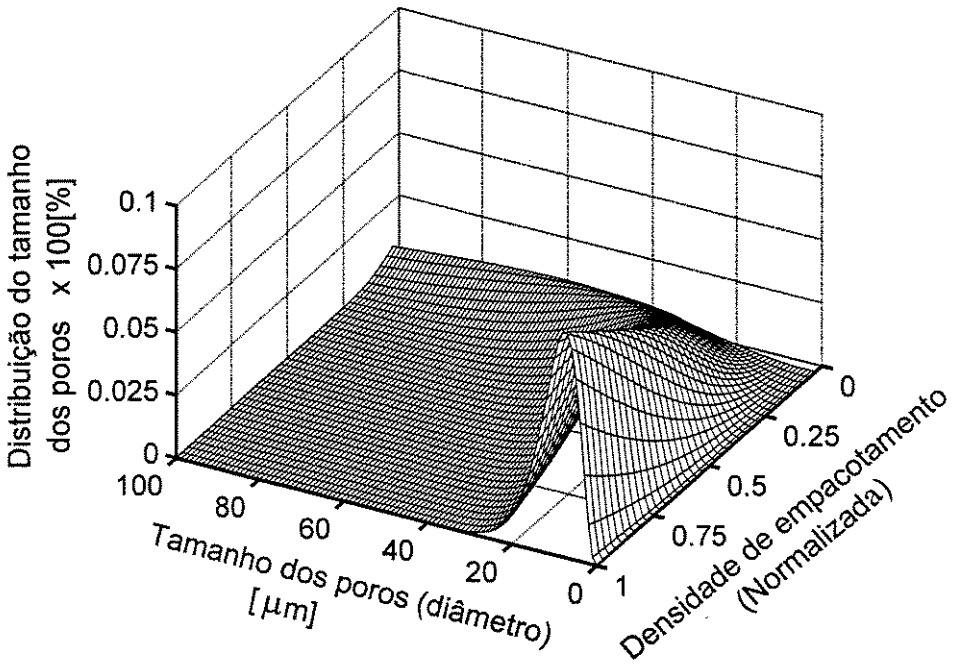



Figura 3.5 - Modelamento da distribuição acumulada de poros em função da densidade de empacotamento e do diâmetro de poros: $\beta = 4,0$ e $0,05 \leq \alpha \leq 0,40$

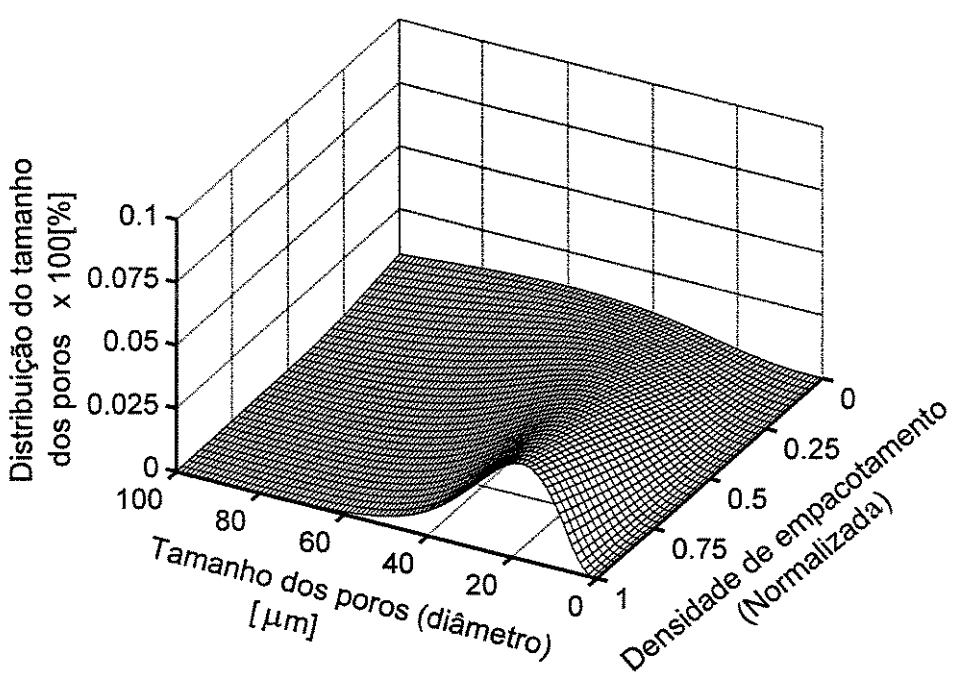



Figura 3.6 - Modelamento da distribuição acumulada de poros em função da densidade de empacotamento e do diâmetro de poros: $\beta = 4,0$ e $0,05 \leq \alpha \leq 0,170$

### *3.4.1 Relação entre porosidade e permeabilidade*

O volume do elemento mostrado na Figura 3.7 , indexado por i e j, com uma espessura e, com um raio r e com um incremento Δr, é dado pela Equação 3.7 , a seguir:

$$V_{i,j} = \pi[(r + \Delta r)^2 - r^2].e \tag{3.7}$$

A porosidade de um elemento ($\phi_{i,j}$) pode ser definida como sendo a relação entre o volume de vazios e o volume total do elemento ($V_{i,j}$), ou seja:

$$\phi_{i,j} = \frac{V_{i,j} - (V_{sol.})_{i,j}}{V_{i,j}} = 1 - \frac{(V_{sol.})_{i,j}}{V_{i,j}} \tag{3.8}$$

Na Equação 3.8, o termo $(V_{sol.})_{i,j}$ expressa o volume de material presente no elemento. Considerando-se a condição de um meio filtrante sem a presença de contaminates, tem-se que este volume é igual ao volume preenchido pelas fibras (para o caso de um filtro constituído por fibras). Considerando-se a condição em que o processo de filtração está ocorrendo, o acúmulo de partículas promove um aumento de material no elemento considerado e um conseqüente aumento no parâmetro $(V_{sol})_{i,j}$ causando, portanto, uma redução na porosidade.

Após um intervalo de tempo, a nova porosidade ($\phi_{i,j}^{new}$), após N partículas de diâmetro $D_P$ terem sido capturadas por um elemento, é dada pela Equação 3.9 :

$$\phi_{i,j}^{new} = 1 - \frac{(V_{sol})_{i,j} + N.(\pi D_P^3)/6}{V_{i,j}} \tag{3.9}$$

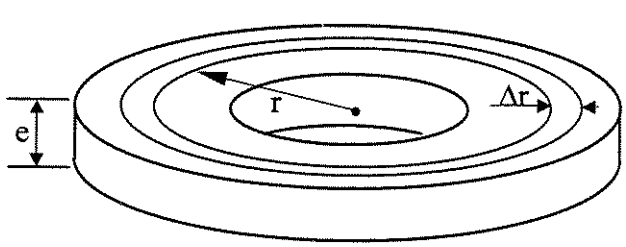



Figura 3.7 - Representação esquemática de um elemento de volume

Em nível macroestrutural, a permeabilidade do meio poroso (filtro) segue a lei de Darcy, ou seja, representa maior ou menor dificuldade à passagem do fluido. Porém, em nível microestrutural, modelos têm sido apresentados no sentido de correlacionar-se a permeabilidade do filtro com a sua microestrutura, levando-se em conta parâmetros tais como tamanho de grão, para o caso de filtros granulares ou diâmetro, distribuição e posicionamento de fibras, para caso de filtros constituídos por fibras. Um dos modelos mais antigos dentro dessa categoria é o modelo capilar, o qual considera que o filtro, ou de uma forma mais geral o meio poroso, é constituído por feixes de tubos capilares. A limitação deste modelo é o fato de que só é aplicado para meio poroso granular, não sendo aplicável para meio poroso constituído por fibras.

A limitação inerente ao modelo capilar é vencida pelo modelo de células, também conhecido como modelo de Kuwabara e Happel, o qual é aplicado tanto para filtros granulares quanto para filtros fibrosos. Este modelo prevê que o filtro é constituído por várias células unitárias, onde os elementos básicos podem ser sólidos no formato esférico (filtro granular) ou cilíndrico (filtro fibroso).

O modelo de células fornece basicamente uma relação entre a porosidade e a permeabilidade de um filtro. Esta relação, para o caso de um filtro constituído por fibras, aparece na Equação 3.10, onde $\delta$ indica o posicionamento espacial da fibra em relação ao escoamento (LI, 1999):

$$K(\delta = 90^{\circ}) = (D_F)^2 \frac{\dfrac{(1-\phi)^2}{[1+(1-\phi)^2]} - \dfrac{1}{2}\ln(1-\phi) - \dfrac{1}{2}}{16(1-\phi)} \tag{3.10}$$

Deve-se destacar que a Equação 3.10 é bastante simplificada, não levando em conta, por exemplo, o fator de forma geométrica. A relação expressa pela Equação 3.10 é válida para o caso onde a direção do escoamento é perpendicular ao eixo longitudinal das fibras, ou seja $\delta = 90^{\circ}$. Na prática, o que acontece é uma distribuição aleatória de fibras, sendo que o ângulo $\delta$ também segue uma distribuição aleatória, de forma que a permeabilidade é diferente nas direções paralela e perpendicular em relação ao eixo longitudinal da fibra (BENIWAL AND CHASE, 1998).

Supondo-se uma célula unitária no formato cúbico conforme a Figura 3.8, a Equação 3.10 é válida para $\theta = 90^{\circ}$ e $0^{\circ} \leq \psi \leq 90^{\circ}$.

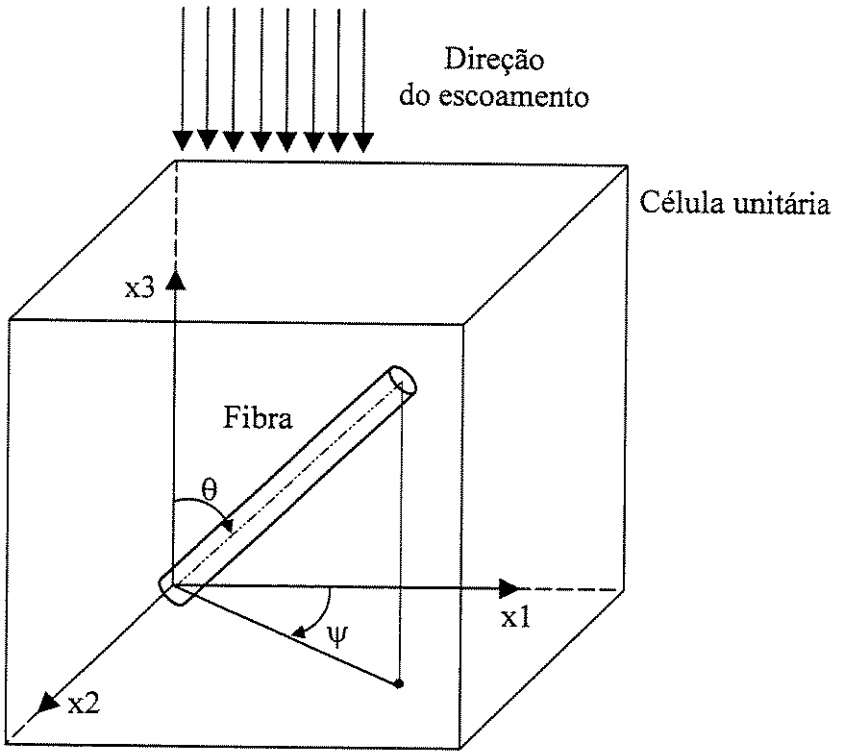



Figura 3.8 - Esquema de uma célula unitária com o posicionamento espacial de uma fibra

Em função da posição da fibra no espaço, pode-se escrever:

$$K_{x1}(\delta_{x1}) = K_{\perp} = \frac{K(\delta = 90^{\circ})}{\text{sen}^2\,\delta_{x1} + \frac{1}{2}\cos^2\delta_{x1}} \tag{3.11}$$

$$K_{x3}(\delta_{x3}) = K_{\parallel} = \frac{K(\delta = 90^{\circ})}{\text{sen}^2\,\delta_{x3} + \frac{1}{2}\cos^2\delta_{x3}} \tag{3.12}$$

de forma que $\cos\delta_{x1} = \text{sen}\,\theta\,\text{sen}\,\psi$ e $\delta_{x3} = \theta$.

A permeabilidade de um determinado elemento ($K_{i,j}$) será dada em função das equações 3.11 e 3.12, conforme a Equação 3.13, a seguir (LI AND PARK, 1999):

$$K_{i,j=}\frac{2}{3}(K_{\perp})^2_{i,j} + \frac{1}{3}(K_{\parallel})^2_{i,j} \tag{3.13}$$

A Equação 3.13 é utilizada para se montar a matriz permeabilidade após cada intervalo de tempo na simulação do processo. A cada intervalo de tempo, a deposição de partículas no meio poroso altera as componentes desta matriz que, por sua vez, altera o escoamento.

## 3.5 Eficiência do processo de filtração

A teoria clássica de filtração prevê que o modelamento da eficiência do processo de retenção de sólidos, ou partículas, pode ser feito considerando-se o filtro como um elemento homogêneo, ou unitário. Desta forma, a eficiência ($\eta_G$) é calculada globalmente pela Equação 3.14:

$$\eta_G = 1 - \frac{n_{out}}{n_{in}} = 1 - e^{(-e_F/L)} \tag{3.14}$$

onde $n_{in}$ e $n_{out}$ são as concentrações de partículas no fluido na entrada e saída do filtro, respectivamente, $e_F$ é a espessura do filtro e L o comprimento.

Para filtros granulares, a teoria acima é razoavelmente válida, pois estes filtro apresentam bom nível de homogeneidade, pelo menos em uma mesoescala, ou seja, um nível intermediário entre o nível microscópico e o nível macroscópico. Porém, os filtros constituídos por fibras são extremamente heterogêneos, mesmo considerando uma mesoescala. A heterogeneidade microestrutural provoca microturbulências no interior do meio filtrante, gerando diferentes campos de velocidade em nível microscópico. Isto afeta diretamente a eficiência local com relação à captura de partículas (SHAPIRO, 1996).

Levando-se em conta a heterogeneidade do meio filtrante, diversas estratégias têm sido usadas no sentido de modelar a eficiência de um processo de filtração. Para o caso de filtros constituídos por fibras, a estratégia utilizada é a estimativa da eficiência unitária ($\eta_F$), relativa a uma fibra de um determinado diâmetro. Para o cálculo dessa eficiência unitária, deve-se levar em conta os diversos mecanismos de interação (ou mecanismos de transporte) entre o contaminante e a estrutura do filtro (RAYNOR AND LEITH, 2000), dentre o quais pode-se considerar: *interceptação*

*pura*, *impactação*, *impacto-interceptação* e *difusão*. Outros efeitos, como é o caso de filtros com propriedades magnéticas, podem ser levados em conta. ZARUTSKAYA AND SHAPIRO (2000) apresenta em seu trabalho o modelo de células, associando equações de campo magnético à eficiência unitária das fibras.

A influência dos mecanismos de transporte ocorrem, ainda, de acordo com a natureza do escoamento que se desenvolve no interior do meio filtrante, o qual pode ser caracterizado basicamente segundo o número de Reynolds (Re) e o número de Stokes (St) definidos, respectivamente, pelas equações 3.15 e 3.16, a seguir:

$$Re_{i,j} = \frac{\rho_f u_{i,j} D_F}{\mu_f (1-\alpha_{i,j})} \tag{3.15}$$

$$St_{i,j} = \frac{\rho_P (D_P)^2 u_{i,j}}{18 \mu_f D_F (1-\alpha_{i,j})} \tag{3.16}$$

A Equação 3.15 é válida quando se consideram filtros constituídos por fibras que apresentem alta porosidade (em torno de 80 a 90 %), e quando a distância entre duas fibras vizinhas for da ordem (ou maior) do diâmetro da fibra (PODGÓRSKI *et al.*, 1995).

A eficiência ($\eta_R$), devida ao mecanismo da interceptação pura, é calculada de acordo com a Equação 3.17 (PTAK, 1998; RAYNOR AND LEITH, 2000), cuja aplicação é recomendável para Re < 1 (MAUS AND UMHAUER, 1997),

$$(\eta_R)_{i,j} = \frac{1+N_R}{Ku}\left[2\ln(1+N_R) - 1 + \alpha_{i,j} + \left(\frac{1}{1+N_R}\right)^2\left(1-\frac{\alpha_{i,j}}{2}\right) - \frac{\alpha_{i,j}}{2}(1+N_R)^2\right] \tag{3.17}$$

$$\text{sendo } N_R = \frac{D_P}{D_F} \tag{3.18}$$

$$Ku = -0.25\alpha_{i,j}^2 - 0.5\ln\alpha_{i,j} + \alpha_{i,j} - 0.75 \tag{3.19}$$

Na Equação 3.17, Ku (definido na Equação 3.19) é o número de Kuwabara e $\alpha_{i,j}$ é a densidade de empacotamento do filtro. $D_P$ e $D_F$, na Equação 3.18, referem-se ao diâmetro das partículas e ao diâmetro das fibras, respectivamente. Pode-se notar que a eficiência devido a este mecanismo leva em conta, basicamente, a interferência entre parâmetros geométricos, ou dimensionais, da estrutura do filtro e do contaminante.

A eficiência devida ao mecanismo de impactação é quantificada por meio da Equação 3.20, ainda para Re < 1:

$$(\eta_I)_{i,j} = \frac{St}{2(Ku)^2}\left((29{,}6 - 28\alpha_{i,j}^{0,62})N_R - 27{,}5N_R^{2,8}\right) \tag{3.20}$$

De acordo, também, com MAUS AND UMHAUER (1997), para Re > 1, considera-se uma combinação entre o mecanismo de impactação e o mecanismo de interceptação pura. A eficiência devido a esta combinação ($\eta_{IR}$) é dada por uma combinação entre o número de Stokes, o número de Reynolds e o parâmetro $N_R$:

$$(\eta_{IR})_{i,j} = \frac{(2St_{i,j} - 0{,}75Re_{i,j}^{-0,2})}{(2St_{i,j} + 0{,}4)^2} + N_R^2 \tag{3.21}$$

MAUS AND UMHAUER (1996), verificoram também que para valores do número de Stokes, St, relativamente baixos (St < 0,4), há um aumento da eficiência unitária devido à impacto-interceptação. Porém, para valores acima de 0,4 ocorre uma diminuição desta eficiência. Para valores de St acima de 2, a Equação 3.21 passa a não ser válida. Neste caso, sugere-se que $\eta_{IR} = \eta^* = \eta_R$. A diminuição da eficiência com o aumento do número de Stokes (para faixa de valores acima de 0,4) deve-se ao fato de que, uma vez ocorrida a colisão com a fibra, aumenta a tendência de arraste da partícula pelo fluido.

A difusão é um mecanismo importante em processos de filtração que envolvem partículas relativamente pequenas ($D_P$ < 1 μm). A Equação 3.22 é utilizada para o cálculo da eficiência devido à difusão:

$$(\eta_D)_{i,j} = 2.6\left(\frac{1-\alpha_{i,j}}{Ku}\right)^{1/3} Pe^{-2/3} \tag{3.22}$$

onde Pe é o número de Peclet, definido na Equação 3.23, em função da velocidade do fluido, diâmetro da fibra e o ceficiente de difusão da partícula ($d_P$):

$$Pe = u_{i,j}\left(\frac{D_F}{d_P}\right) \tag{3.23}$$

A eficiência unitária é obtida pela soma algébrica das contribuições dos diversos mecanismos, de acordo com a Equação 3.24:

$$(\eta_F)_{i,j} = (\eta_R)_{i,j} + \eta^* + (\eta_D)_{i,j} \begin{cases} \eta^* = (\eta_I)_{i,j}, \text{ se } Re < 1 \text{ e } 0 < St < 0{,}4 \\ \eta^* = (\eta_{IR})_{i,j}, \text{ se } Re > 1 \text{ e } 0{,}4 < St < 2 \\ \eta^* = (\eta_R)_{i,j}, \text{ se } Re > 1 \text{ e } St > 2 \end{cases} \tag{3.24}$$

THOMAS *et al.* (1999) sugerem, ainda, que para partículas na faixa de tamanhos entre 0,1 e 0,3 μm, a eficiência unitária seja calculada pela soma das eficiências devidas à difusão e à interceptação, ou seja, $\eta_F = \eta_D + \eta_I$, uma vez que para partículas dessa ordem de tamanho, a influência do mecanismo da impactação (que é inerente à inércia das partículas) não ocorre de forma significativa.

A eficiência de cada elemento do filtro é calculada segundo a Equação 3.25, dada a seguir (ZHU *et al.* 2000):

$$(\eta_T)_{i,j} = 1 - \exp\left[\frac{-4\alpha_{i,j}(\Delta r)(\eta_F)_{i,j}}{\pi D_F(1-\alpha_{i,j})}\right] \tag{3.25}$$

## 3.6 Simulação numérica

### *3.6.1 Domínio físico e domínio computacional*

Para se resolver o problema numericamente, é necessário discretizar as equações diferenciais envolvidas. Uma das formas de se discretizar uma equação diferencial parcial é utilizando-se o método das diferenças finitas. Tendo-se a equação na forma discreta, o próximo passo é resolvê-la para cada ponto do domínio físico considerado. O domínio considerado também deve ser discretizado de forma a se obter uma malha de pontos.

Quanto maior o refinamento da malha utilizada na discretização do domínio físico, maior a precisão do modelo, tal como sugerido por JACOVKIS *et al.* (1999). Na geometria considerada, adotando-se uma variação espacial constante para r ($\Delta r$ = constante), a distância entre pontos na direção de r é constante e, portanto, o refinamento da malha é desproporcional entre as regiões próximas ao centro e as regiões próximas à borda externa. Para se promover um nível de refinamento proporcional e, ao mesmo tempo, trabalhar com incrementos espaciais constantes, procede-se a uma mudança de variáveis, de tal forma a obter um novo sistema de coordenadas (x,z), tal que $x = \ln(\mathbf{r}/r_w)$ e $z = \mathbf{z}/L$ e, para a variável tempo, $t = \mathbf{t}/(\mu c)$. Desta forma, a Equação 3.5 passa a ser escrita como:

$$\frac{1}{r_w^2} e^{-2x} \frac{\partial}{\partial x}\left( k_X(x,z) \frac{\partial p}{\partial x}(x,z) \right) + \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial z}\left( k_Z(r,z) \left( \frac{1}{L} \frac{\partial p}{\partial z}(x,z) - \rho g \right) \right) = \phi(x,z) \frac{\partial p}{\partial t}(x,z,t) \qquad (3.26)$$

### *3.6.2 Método das diferenças finitas*

O método das diferenças finitas aplicado a equações diferenciais parciais consiste em substituir os termos das derivadas por termos que representam a propriedade em questão em um domínio discreto. Considere-se uma propriedade geral *u*, e uma equação diferencial parcial do tipo parabólica (Equação 3.27), no domínio espacial caracterizado pelas coordenadas x e y e no domínio do tempo.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \tag{3.27}$$

Aplicando-se o método das diferenças finitas, obtém-se a Equação 3.27 na forma discretizada, da seguinte maneira:

$$\frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \frac{u_{i+1,j}^{n} - 2u_{i,j}^{n} + u_{i-1,j}^{n}}{(\Delta x)^2} + \frac{u_{i,j+1}^{n} - 2u_{i,j}^{n} + u_{i,j-1}^{n}}{(\Delta y)^2} \tag{3.28}$$

sendo que $\Delta x$ e $\Delta y$ representam o passo da discretização do domínio *x-y*, e i,j são o índices dos pontos na direção de x e y, respectivamente (Figura 3.9), e o índice n e n+1 indicam posições sucessivas no tempo, espaçadas de $\Delta t$.

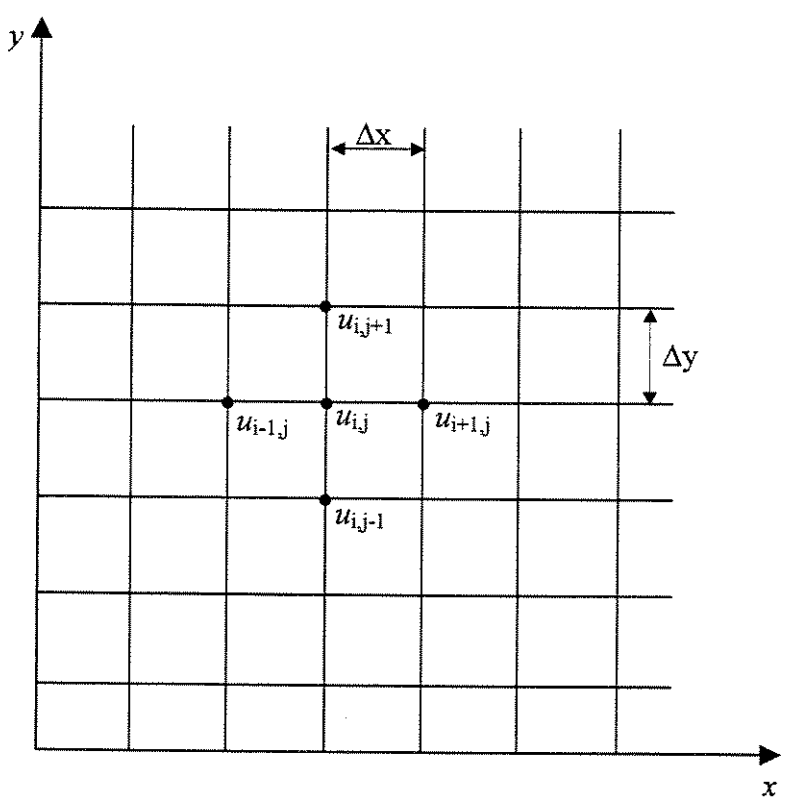



Figura 3.9 - Representação esquemática de um domínio x-y em diferenças finitas

O método das diferenças finitas será aplicado, então, na Equação 3.26. Neste novo sistema de coordenadas, utiliza-se um domínio retangular ($\Omega$) definido por:

$$\Omega = \left\{ (x,z) / 0 \le x \le \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right),\ 0 \le z \le 1 \right\} \tag{3.29}$$

Na Figura 3.10 vê-se a esquematização do domínio $\Omega$, representado pela Equação 3.29, que também pode ser chamado de domínio computacional, e a correlação com o domínio físico (filtro). O domínio $\Omega$ é discretizado, então, em uma malha uniforme cujos incrementos espaciais são $\Delta x$ e $\Delta z$, e caracterizam as dimensões de cada elemento. A discretização da Equação 3.26 permite o cálculo da pressão $P^n_{i,j}$ em cada ponto ($x_i$, $z_j$), representativo da malha, e no domínio do tempo.

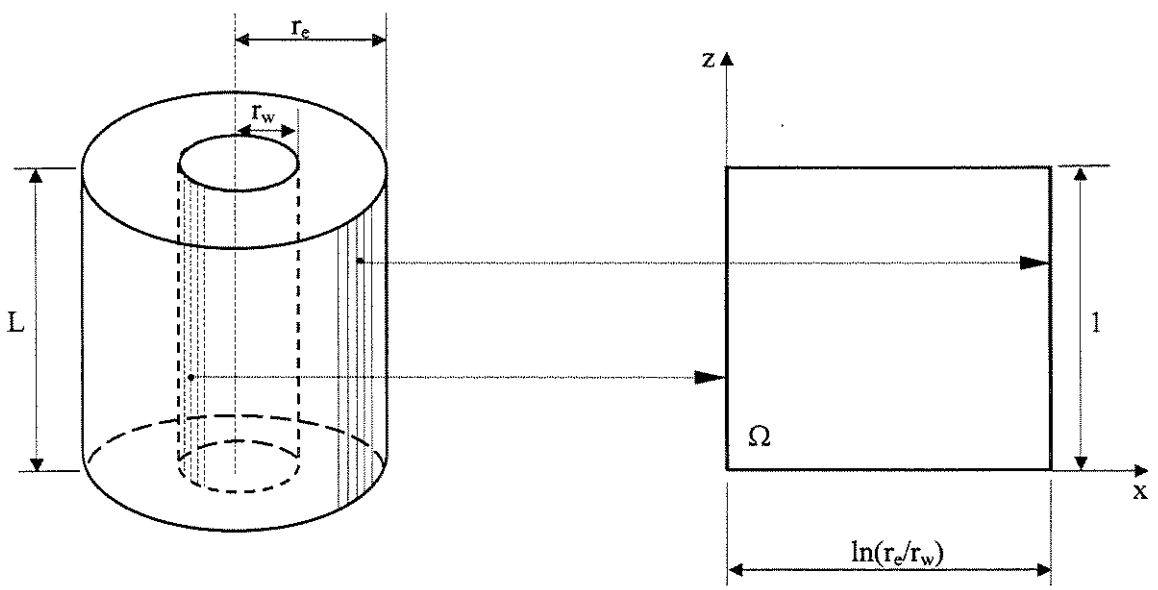



Figura 3.10 - Representação do domínio retangular (computacional) e correlação com o domínio físico (filtro)

### *3.6.3 Discretização por meio de diferenças finitas*

Uma das formas de se obter uma equação diferencial parcial na forma discretizada é aplicando-se o método das diferenças finitas. Aplicando-se este método na Equação 3.26, obtém-se a Equação 3.30, a seguir:

$$\frac{1}{r_w^2}e^{-2x_i}\left[\frac{\dfrac{K_{x_{[i+(1/2),j]}}\left(P^n_{i+1,j}-P^n_{i,j}\right)}{\Delta x}-\dfrac{K_{x_{[i-(1/2),j]}}\left(P^n_{i,j}-P^n_{i-1,j}\right)}{\Delta x}}{\Delta x}\right]+$$

$$\frac{1}{L}\left[\frac{K_{z_{[i,j+(1/2)]}}\left(\left(\frac{1}{L}\right)\left(\frac{P^n_{i,j+1}-P^n_{i,j}}{\Delta z}\right)-\rho g\right)-K_{z_{[i,j-(1/2)]}}\left(\left(\frac{1}{L}\right)\left(\frac{P^n_{i,j}-P^n_{i,j-1}}{\Delta z}\right)-\rho g\right)}{\Delta z}\right]= \qquad (3.30)$$

$$\phi_{i,j}\left(\frac{P^{n+1}_{i,j}-P^n_{i,j}}{\Delta t}\right)$$

Explicitando-se $\Delta x$, $\Delta z$ e $1/L$ na Equação 3.30, escreve-se a Equação 3.31:

$$\left(\frac{1}{r_w^2}e^{-2x_i}\frac{1}{(\Delta x)^2}\right)\left[K_{x_{[i+(1/2),j]}}\left(P^n_{i+1,j}-P^n_{i,j}\right)-K_{x_{[i-(1/2),j]}}\left(P^n_{i,j}-P^n_{i-1,j}\right)\right]+$$

$$\left(\frac{1}{L^2(\Delta z)^2}\right)\left[K_{z_{[i,j+(1/2)]}}\left(\left(P^n_{i,j+1}-P^n_{i,j}\right)-L(\Delta z)\rho g\right)-K_{z_{[i,j-(1/2)]}}\left(\left(P^n_{i,j}-P^n_{i,j-1}\right)-L(\Delta z)\rho g\right)\right]= \qquad (3.31)$$

$$\phi_{i,j}\left(\frac{P^{n+1}_{i,j}-P^n_{i,j}}{\Delta t}\right)$$

Na Equação 3.31, pode-se fazer as seguintes substituições:

$$1)\ \left(\frac{\Delta t}{\phi_{i,j}}\right)\frac{1}{r_w^2}e^{-2x_i}\frac{1}{(\Delta x)^2}=a_{i,j}=a_o$$

$$2)\ \left(\frac{\Delta t}{\phi_{i,j}}\right)\frac{1}{L^2(\Delta z)^2}=b_{i,j}=b_o$$

3) $P^n_{i,j} = P^n_0$ (Ponto atual)

4) $P^n_{i-1,j} = P^n_L$ (Ponto à esquerda do ponto atual)

5) $P^n_{i+1,j} = P^n_R$ (Ponto à direita do ponto atual)

6) $P^n_{i,j+1} = P^n_A$ (Ponto acima do ponto atual)

7) $P^n_{i,j-1} = P^n_B$ (Ponto abaixo do ponto atual)

8) $Kx_{[i-(1/2),j]} = (K_{i-1,j} + K_{i,j})/2 = K_L$

9) $Kx_{[i+(1/2),j]} = (K_{i+1,j} + K_{i,j})/2 = K_R$

10) $Kz_{[i,j+(1/2)]} = (K_{i,j+1} + K_{i,j})/2 = K_A$

11) $Kz_{[i,j-(1/2)]} = (K_{i,j-1} + K_{i,j})/2 = K_B$

Após as substituições, a Equação 3.31 pode ser escrita como:

$$a_o\left[K_R\left(P^n_R - P^n_0\right) - K_L\left(P^n_0 - P^n_L\right)\right] + b_o\left[K_A\left(P^n_A - P^n_0\right) - K_B\left(P^n_0 - P^n_B\right) + c_{o1}\right] = P^{n+1}_0 - P^n_0 \qquad (3.32)$$

onde $c_{o1}$=L.($\Delta$z).$\rho$.g.($K_B$-$K_A$).

Rearranjando-se a Equação 3.32 de forma a agrupar as componentes de pressão, e fazendo-se $c_o = c_{o1}.b_o$, pode-se escrever:

$$\left[(a_oK_L)P^n_L - a_o(K_R + K_L)P^n_0 + (a_oK_R)P^n_R\right] +$$
$$\left[(b_oK_A)P^n_A - b_o(K_A + K_B)P^n_0 + (b_oK_B)P^n_B + c_o\right] = P^{n+1}_0 - P^n_0 \qquad (3.33)$$

### *3.6.4 O Método A.D.I (Alternating-Direction Implicit)*

Quando se escreve a equação discretizada para um problema unidimensional, obtêm-se três termos (do lado esquerdo da equação) para cada ponto do domínio, sendo que a cada ponto corresponde uma equação. A solução do sistema de equações é obtida aplicando-se o método da matriz tridiagonal (*TDMA*).

Porém, quando o problema é bidimensional, a matriz resultante tem a forma pentadiagonal. A estratégia do método A.D.I é aplicar o recurso *TDMA* nas duas direções do domínio alternadamente. GERALD AND WHEATLEY (1994) apresentam este método, porém, somente para equações com coeficientes constantes, ou seja, para meios anisotrópicos (onde as propriedades variam com as direções), é necessário fazerem-se várias adaptações.

Considerando a Equação 3.33, escreve-se a mesma equação de forma que os termos que reapresentam as derivadas sejam escritos como uma combinação de espaçamento no tempo e no espaço, resultando nas equações seguintes:

$$\left[(a_o K_L)P_L^{(n+1)} - a_o(K_R + K_L)P_0^{(n+1)} + (a_o K_R)P_R^{(n+1)}\right] + \left[(b_o K_A)P_A^{(n)} - b_o(K_A + K_B)P_0^{(n)} + (b_o K_B)P_B^{(n)} + c_o\right] = P_0^{(n+1)} - P_0^n \tag{3.34}$$

$$\left[(a_o K_L)P_L^{(n+1)} - a_o(K_R + K_L)P_0^{(n+1)} + (a_o K_R)P_R^{(n+1)}\right] + \left[(b_o K_A)P_A^{(n+2)} - b_o(K_A + K_B)P_0^{(n+2)} + (b_o K_B)P_B^{(n+2)} + c_o\right] = P_0^{(n+2)} - P_0^{(n+1)} \tag{3.35}$$

As Equações 3.34 e 3.35 podem ser rescritas de tal forma que as componentes de pressão pertencentes a um mesmo instante de tempo sejam agrupadas, conforme as Equações 3.36 e 3.37:

$$-a_o K_L P_L^{(n+1)} + \left[1 + a_o\left(K_R + K_L\right)\right] P_0^{(n+1)} - a_o K_R P_R^{(n+1)} = \tag{3.36}$$

$$b_o K_A P_A^{(n)} + \left[1 - b_o\left(K_A + K_B\right)\right] P_0^{(n)} + b_o K_B P_B^{(n)} + c_o$$

$$-b_o K_A P_A^{(n+2)} + \left[1 + b_o\left(K_A + K_B\right)\right] P_0^{(n+2)} - b_o K_B P_B^{(n+2)} + c_o = \tag{3.37}$$

$$a_o K_L P_L^{(n+1)} + \left[1 - a_o\left(K_R + K_L\right)\right] P_0^{(n+1)} + a_o K_R P_R^{(n+1)}$$

As Equações 3.36 e 3.37 podem ser escritas de forma mais simplificada, obtendo-se as Equações 3.38 e 3.39, as quais representam os esquemas para a aplicação da varredura horizontal ("*Horizontal transverse*" e da varredura vertical ("*Vertical transverse*"), respectivamente:

$$\boxed{-\mathbf{r}_1 P_L + (1 + \mathbf{c}_1) P_0 - \mathbf{r}_2 P_R = \mathbf{r}_3 P_A + (1 - \mathbf{c}_2) P_0 + \mathbf{r}_4 P_B + c_o} \quad \textit{Horizontal transverse} \tag{3.38}$$

$$\boxed{-\mathbf{r}_3 P_A + (1 + \mathbf{c}_2) P_0 - \mathbf{r}_4 P_B + c_o = \mathbf{r}_1 P_L + (1 - \mathbf{c}_1) P_0 + \mathbf{r}_2 P_R} \quad \textit{Vertical transverse} \tag{3.39}$$

onde os coeficientes $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}_2$, $\mathbf{r}_3$, $\mathbf{r}_4$, $\mathbf{c}_1$ e $\mathbf{c}_2$ englobam todos os termos de permeabilidade e os coeficientes $a_o$ e $b_o$, que aparecem nas equações 3.36 e 3.37. Estas equações são utilizadas para a implementação do método A.D.I para o cálculo do escoamento (pressão e velocidade), juntamente com as condições de contorno estabelecidas conforme se descreve no próximo item.

### *3.6.5 Condições de contorno*

#### *3.6.5.1 Condições de contorno do tipo Dirichlet*

As condições de contorno do tipo *Dirichlet* são aquelas que se estabelecem, atribuindo-se no contorno ou na fronteira desejada, valores conhecidos da variável em consideração, tal como pressão, velocidade, temperatura, etc. Na Figura 3.11 destacam-se quatro regiões de fronteira, que representam os limites geométricos do filtro, bem como os eixos em coordenadas (x, z),

representando estes limites. As Regiões 1 e 2 correspondem às extremidades, a Região 3 corresponde à superfície interna e a Região 4 corresponde à superfície externa do filtro. Nos eixos coordenados, vistos na Figura 3.11, apresenta-se o esquema de condições de contorno usado.

Em pelos menos uma das regiões, necessita-se aplicar uma condição de contorno do tipo Dirichlet. A configuração deste tipo de condição de contorno reside no fato da maior ou menor dificuldade de se medir experimentalmente a variável em questão (LABECKI *et al.*, 1995). No caso do cálculo do escoamento, estão envolvidas a pressão e a velocidade. Considerando-se que, usualmente, a medida da pressão é mais conveniente, esta será a variável atribuída segundo as condições do tipo Dirichlet, a qual será aplicada superfície interna (Região 3).

*3.6.5.2 Condições de contorno do tipo do tipo Neumann*

As condições de contorno do tipo Neumann são aquelas em que se estabelece um valor para o gradiente da variável em questão.

Nas Regiões 1 e 2, não há fluxo na direção z, sendo, portanto, o gradiente de pressão nesta direção igual a zero, ou seja, condições do tipo Neumann são aplicadas nestas regiões:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_1 = 0, \left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_2 = 0 \tag{3.40}$$

Na Região 4 (superfície externa) aplica-se a condição de contorno definida pela lei de Darcy, ou seja:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_4^{r=r_e} = \frac{\mu}{K_4} u_4 \tag{3.41}$$

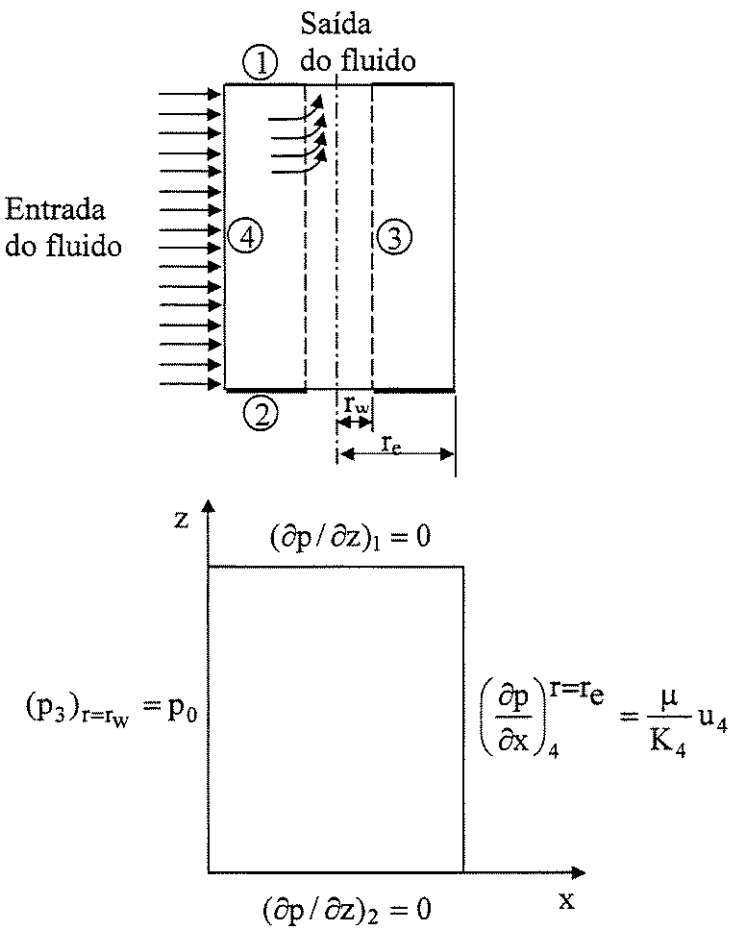



Figura 3.11 - Esquema usado na definição das condições de contorno

### *3.6.6 Critério de convergência*

Observando-se as Equações 3.38 e 3.39, pode-se extrair duas condições para que haja convergência e estabilidade, conforme descritas a seguir:

$$(1-c_1) = 1 - b_o(K_A + K_B) \Rightarrow \left(\frac{\Delta t}{\phi_{i,j}}\right) \frac{1}{L^2(\Delta z)^2}(K_A + K_B) \leq 1 \tag{3.42}$$

$$(1-c_2) = 1 - a_o(K_R + K_L) \Rightarrow \left(\frac{\Delta t}{\phi_{i,j}}\right) \frac{1}{r_w^2} e^{-2x_i} \frac{1}{(\Delta x)^2}(K_R + K_L) \leq 1 \tag{3.43}$$

Significa, portanto, que a adoção do $\Delta t$ está vinculada aos valores de $\Delta X$, $\Delta Y$ e da permeabilidade (K). Ou seja, a escolha de um $\Delta t$ que não satisfaça as condições apresentadas nas equações 3.42 e 3.43 leva o algoritmo a perder a estabilidade e divergir.

### *3.6.7 Estratégia de injeção de partículas*

A principal etapa na simulação do processo de filtração é a geração, ou injeção, do material contaminante no filtro. Isto é feito por meio da utilização de funções randômicas (ou aleatórias), que simulem a presença de partículas no fluido. IMDAKM AND SAHIMI (1991) sugere que diferentes estratégias podem ser utilizadas. Por exemplo, uma partícula pode ser injetada no tempo $t_0$, outra partícula injetada no tempo $t_1$, e assim sucessivamente. Esta estratégia normalmente está relacionada com outra estratégia, que é o cálculo da trajetória da partícula por meio de equações de movimento (LESSMANN *et al.*, 1989 e ROTARIU *et al.*, 1998). Outra estratégia é a injeção de N partículas no tempo $t_0$, N partículas no tempo $t_1$, etc. A segunda ocorrência parece se mais próxima do que acontece na prática, já que num processo de filtração real, partículas não se deslocam individualmente, de forma que o meio filtrante recebe diversas partículas, mesmo considerando um intervalo de tempo muito pequeno, da ordem de décimos de segundo, por exemplo.

No processo aleatório de geração de contaminantes, os parâmetros básicos utilizados foram o diâmetro das partículas e a quantidade, que é traduzida em termos do número de partículas. Estes dois parâmetros são as variáveis de entrada para a rotina computacional responsável pela simulação da injeção de partículas. Com relação ao diâmetro, pode-se estabelecer os limites inferior ($D_{Pmín.}$) e superior ($D_{Pmáx.}$) e, com relação ao número de partículas, pode-se estabelecer o número N, que se pretende injetar em cada passo da simulação, com diâmetros distribuídos entre os limites inferior e superior.

Uma vez estabelecida a forma de injeção de partículas (N partículas por intervalo de tempo), fez-se necessário estimar N. Para esta estimativa, usou-se as características do contaminante empregado na realização experimental. Em média, são $2x10^5$ partículas/grama. Supondo-se a filtração de 100 litros de um fluido com uma concentração de contaminante de 1,0

g/l, a estimativa do número de partículas será $2x10^7$. Para se atribuir um valor para N nas simulações, deve-se avaliar também a ordem do intervalo de tempo utilizado, que está vinculado a outros parâmetros tais como a permeabilidade e os passos de discretização da malha ($\Delta X$ e $\Delta Z$). Supondo-se que seja possível utilizar um intervalo de tempo de 1,0 segundo e que se queira simular 1,5 horas de filtração (5400 intervalo de tempos), resulta em aproximadamente 3700 partículas por intervalo de tempo.

A rotina computacional responsável pela simulação da injeção de partículas gera N partículas a cada intervalo de tempo, cujos diâmetros estarão distribuídos aleatoriamente entre $D_{Pmín.}$ e $D_{Pmáx.}$ estabelecidos pelo usuário. A cada intervalo de tempo, seleciona-se uma partícula $P_1$ do total de N geradas (no intervalo de tempo considerado), e simula-se a sua colisão com a parede do filtro. A partícula irá se chocar em uma posição aleatória ($\mathbf{E_{i,j}}$), conforme mostrado na Figura 3.12. Uma vez ocorrida a colisão, calcula-se a probabilidade desta partícula ser ou não capturada naquela posição ($\mathbf{E_{i,j}}$) onde ocorreu o choque. Se for capturada, incrementa-se de uma unidade a variável correspondente ao número de partículas capturadas naquela posição, e seleciona-se outra partícula ($P_2$). Senão, executa-se o segundo passo, que é a definição de qual caminho a partícula seguirá.

Considerando a rede esquematizada na Figura 3.12 e uma trajetória discreta no domínio XY, observa-se que a partícula terá 3 opções, podendo ir para um dos dois elementos $E_{i-1,j}$ ou $E_{i+1,j}$ (acima ou abaixo) da posição atual, ou ir para a camada seguinte, para o elemento $E_{i,j+1}$. Admite-se que a partícula não pula para um elemento que não seja vizinho da posição onde se encontra e nem que a partícula volte, ou seja, que não haja refluxo no filtro. Para se definir para qual destas 3 posições a partícula irá, compara-se a intensidade de fluxo entre a posição atual e as 3 consideradas. Conforme sugerido por REGE AND FOGLER (1987), a partícula tende a ir para o elemento onde o fluxo for maior. Escolhido o elemento, calcula-se novamente a probabilidade da partícula ser por ele capturada. Se não for capturada, repete-se o passo anterior sucessivas vezes até que a partícula seja capturada ou escape, sem ser capturada. Terminado o teste para a partícula $P_1$, seleciona-se outra partícula $P_2$ e repete-se o mesmo procedimento. Procede-se assim, sucessivamente, até terminar as partículas correspondentes àquele intervalo de tempo, ou seja, até $P_N$.

Ao final de cada intervalo de tempo, após todas as partículas terem sido testadas, o programa principal executa a rotina responsável pelo cálculo da nova matriz-porosidade e a rotina que recalcula a nova matriz-permeabilidade, ambas alteradas pelo acúmulo de N partículas (ou uma parcela de N partículas). Com as novas matrizes de porosidade e permeabilidade, o programa principal executa a rotina responsável pelo cálculo do escoamento no instante considerado. E, assim sucessivamente, até o final da simulação.

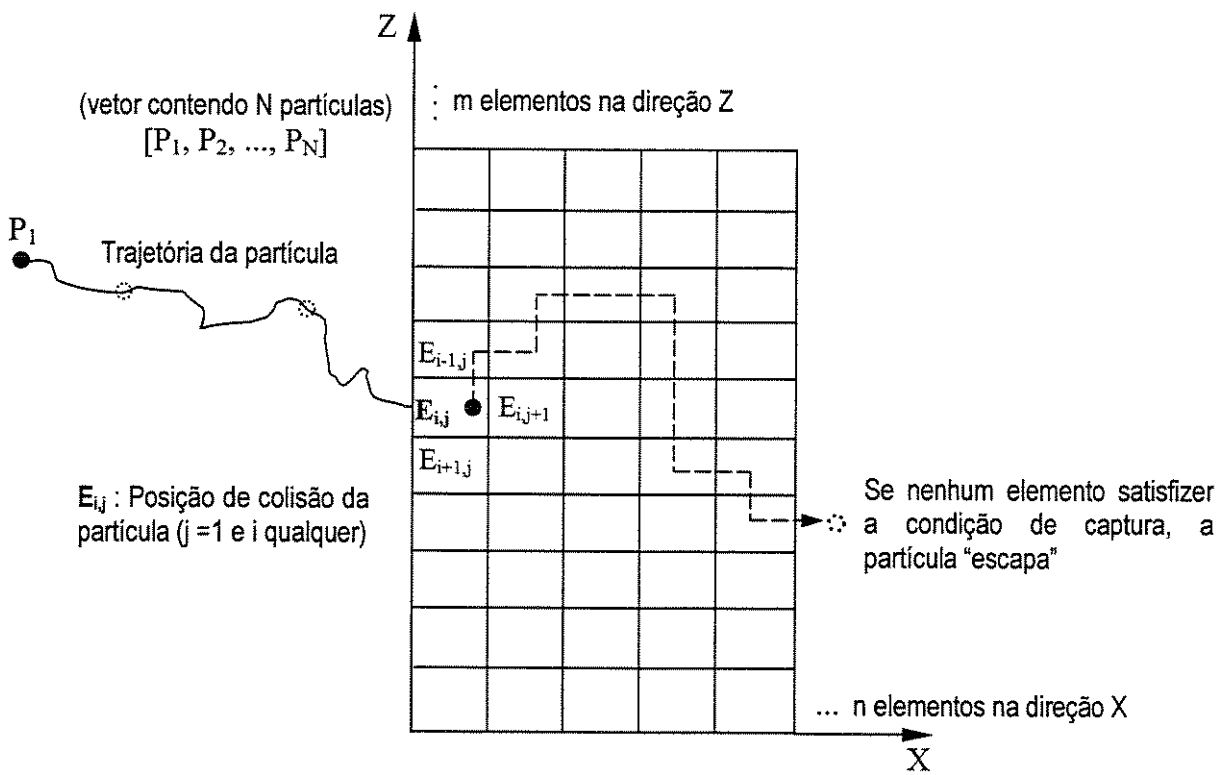



Figura 3.12 - Diagrama esquemático da simulação da injeção de partículas

# Capítulo 4

# Tomografia Computadorizada de Raios-X e Aplicações

## 4.1 Introdução e aspectos teóricos

A Tomografia Computadorizada de Raios-X é uma técnica de mapeamento digital a partir do qual obtém-se uma imagem que representa o nível de atenuação do material ao feixe de Raios-X que o atravessa. A imagem gerada representa, portanto, um mapa do coeficiente de atenuação linear do material.

Esta técnica foi inicialmente desenvolvida para diagnósticos médicos. Porém, devido ao rápido avanço tecnológico verificado no campo computacional, tem extrapolado a área médica e vem sendo aplicada em diversas outras áreas (BRAZ *et al.*, 1999), com grande destaque para a área de engenharia, onde se verifica um campo de aplicação bastante vasto, podendo-se citar a área de Engenharia de Petróleo, Engenharia de Materiais, dentre outras. Os aparelhos de tomografia estão ficando cada vez mais sofisticados e um dos aspectos importantes são os recursos oferecidos para o armazenamento dos dados (imagens). Atualmente existem diversas possibilidades. As imagens podem ser armazenadas em fitas, do tipo DDS, em disco óptico e também em disquetes simples de 3½ ". Isto facilita o intercâmbio dos dados para análise e processamento, posteriores ao exame tomográfico.

As descrições que ocorrem a seguir referem-se a tomógrafos médicos, ainda que existam tomógrafos industriais de altíssima energia e concepções bastante diferentes. Pretende-se, com este capítulo, dar um panorama sobre a técnica, comentando-se sobre seus princípios básicos e os procedimentos necessários para a realização de um ensaio tomográfico, e aplicações encontradas na literatura.

O esquema mostrado na Figura 4.1 é a representação simplificada de um sistema de tomografia. Para obter a imagem de uma determinada seção, são necessárias inúmeras projeções, que são feitas através da passagem do feixe de Raios-X pelo objeto. O feixe é emitido sob vários ângulos $\beta_T$. Cada projeção, passando por um ponto genérico P no interior do objeto é uma função unidimensional da coordenada $x_r$, perpendicular ao caminho do raio, onde $x_r$ é uma das coordenadas de um sistema de referência $(x_r, y_r)$.

Para cada incremento do ângulo $\beta_T$, tem-se uma projeção, que é dada por $P(x_r, \beta_T)$, ou $P_{\beta T}(x_r)$. Os detectores monitoram a diferença de energia entre os Raios-X incidentes e emergentes. A formação da imagem é baseada nesta diferença, que é tanto maior quanto maior for o coeficiente de atenuação do material no caminho do feixe.

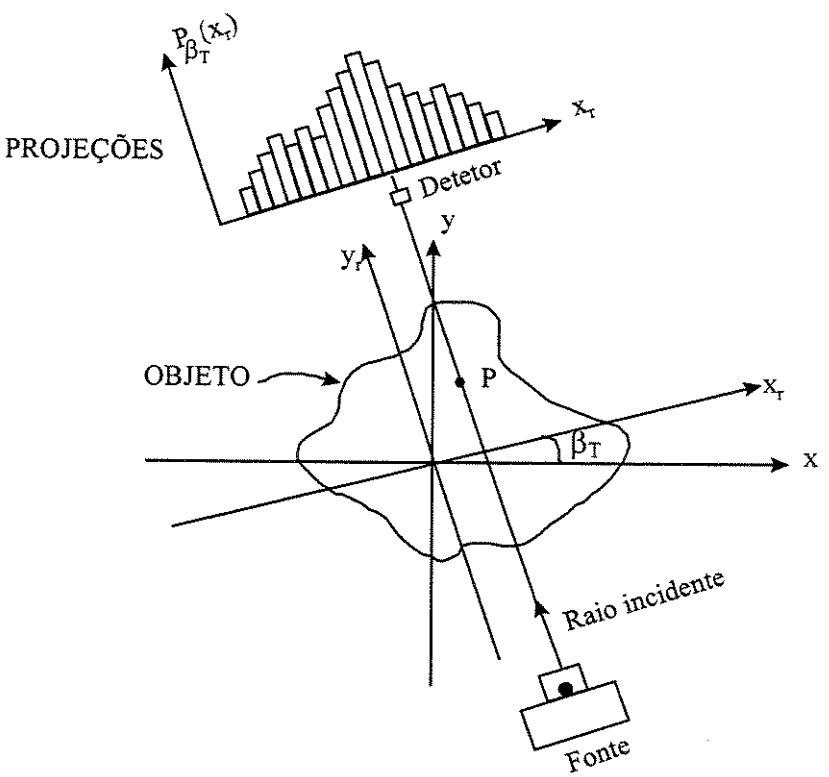



Figura 4.1 - Diagrama esquemático das projeções em sistema de tomografia

O tomógrafo é composto, basicamente, por uma fonte de Raios-X e por um conjunto de detectores (Figura 4.2). Os detectores e a fonte ficam posicionados diametralmente opostos na cavidade ("*gantry*") onde o paciente é alojado no momento do exame. A fonte emite um feixe de Raios-X, com intensidade $I_0$ que, ao atravessar o objeto, sofre processos de atenuação e emerge com intensidade I. A fonte, em conjunto com os detectores, gira em torno do objeto de forma a promover uma varredura em torno deste.

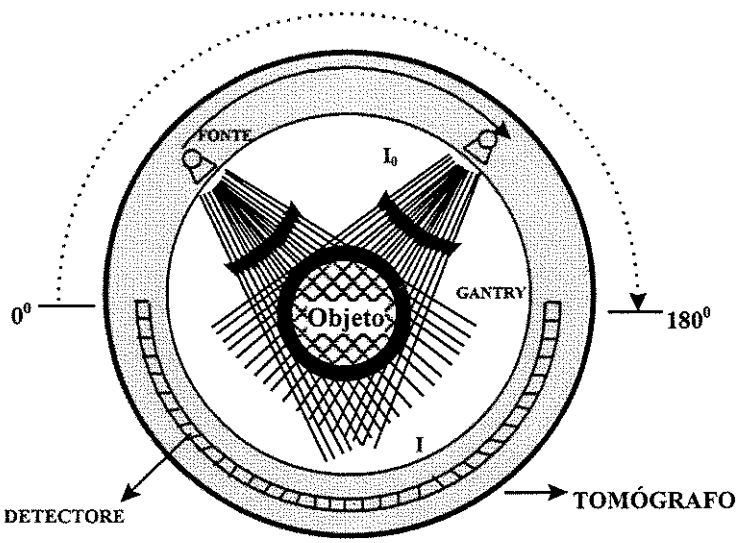



Figura 4.2 - Diagrama esquemático de um tomógrafo

Supondo-se que uma amostra seja composta por materiais com diferentes coeficientes de atenuação (Figura 4.3), a equação que rege a atenuação do feixe, considerado monocromático, é dada a seguir:

$$I = I_0 \exp(-\sum_{i=1}^{n} \kappa_i w_i)$$

sendo $I_0$ e I a intensidade de energia do feixe incidente e do feixe emergente, respectivamente, $\kappa_i$ é o coeficiente de atenuação das diferentes partes do material e w é a espessura das partes.

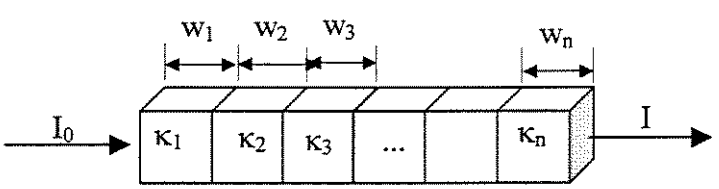



Figura 4.3 - Atenuação de um feixe de intensidade $I_0$ em uma amostra heterogênea

A imagem gerada é uma matriz composta por *pixels*, que é o componente elementar da imagem. A cada *pixel* é atribuído um valor numérico, o qual é proporcional ao coeficiente de atenuação linear, que por sua vez depende da densidade do material. Assim, os valores dos *pixels* expressam a densidade do material ponto a ponto. Este é um aspecto interessante relacionado a esta técnica, pois permite o estudo de propriedades de um determinado material ponto a ponto, como, por exemplo, as reticulações num polímero submetido a um esforço mecânico. Medindo-se a densidade, é possível avaliar como se comporta o material frente a esse esforço. Assim, um aumento na densidade é um bom indicativo do aumento das reticulações, ou da cristalinidade do polímero. Na Figura 4.4, mostra-se um diagrama esquemático de uma seqüência de cortes tomográficos (*slices*), bem como os detalhes de uma fatia e uma amostra de 4 *voxels* (elemento de volume que dá origem ao *pixel*) e 4 *pixels*.

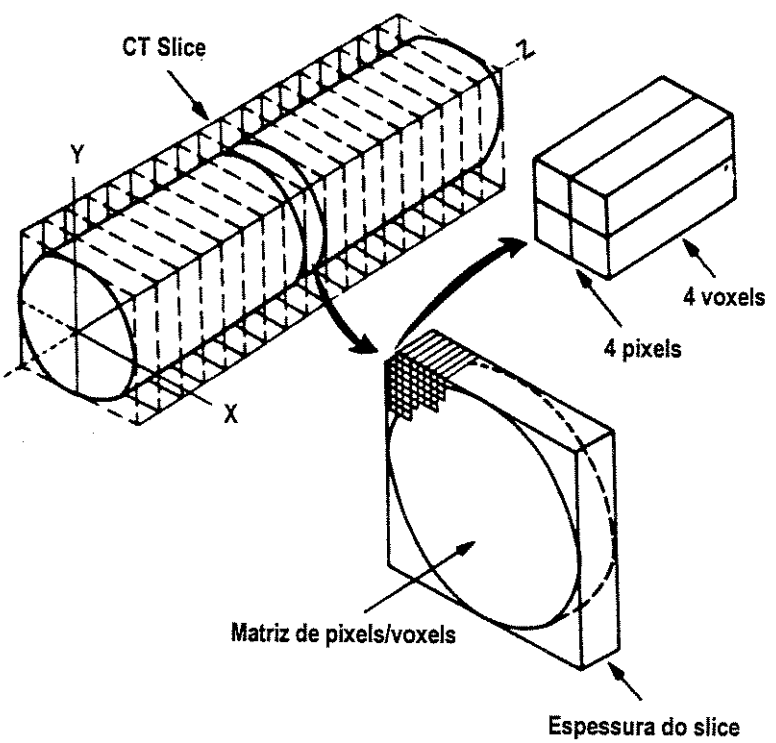



Figura 4.4 - Diagrama esquemático de uma seqüência de cortes tomográficos (*slices*)

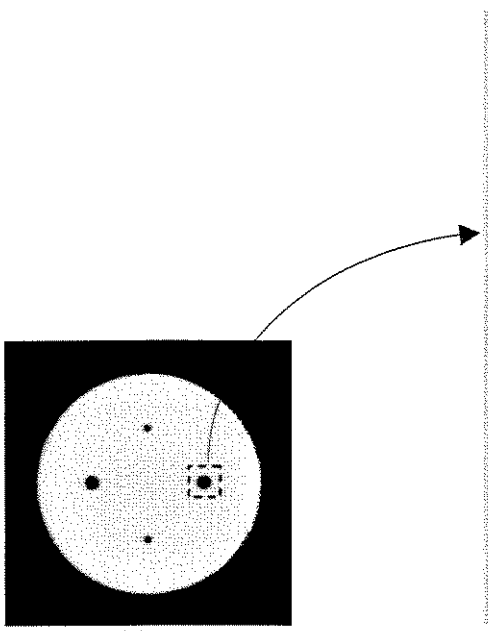
A unidade tomográfica é chamada de Hounsfield (H) e a medida obtida (valor dos elementos da matriz-imagem) é referenciada como números CT. A escala de números CT é normalizada em relação à água, ou seja, $CT_{água} = 0$. A imagem é formada por níveis de cinza intermediários entre

o preto e o branco. Os tons escuros correspondem a valores baixos de números CT e tons claros correspondem a valores altos. Assim, por exemplo, regiões correspondentes ao ar, aparecem na imagem totalmente pretas. Na Figura 4.5-a tem-se uma imagem tomográfica de um tarugo de alumínio, onde se pode ver quatro furos (os dois maiores de 2 mm de diâmetro e os menores de 1 mm). Na Figura 4.5-b mostra-se o mapa de *pixels* referente a um dos furos, como está representado na Figura 4.5-a. Os valores negativos observados correspondem à região do furo.

A atenuação do feixe é convertida em unidades tomográficas segundo a equação dada a seguir:

$$CT = 1000\left(\frac{\kappa_{mat.} - \kappa_{água}}{\kappa_{água}}\right)$$

sendo $\kappa_{mat.}$ e $\kappa_{água}$ os coeficientes de atenuação do material tomografado e da água, respectivamente.



(a)

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2100 | 1761 | 1409 | 1176 | 1155 | 1347 | 1682 | 2044 |
| 1667 | 1072 | 548 | 245 | 219 | 471 | 942 | 1539 |
| 1151 | 392 | -181 | -459 | -482 | -277 | 228 | 983 |
| 752 | -74 | -590 | -786 | -803 | -679 | -243 | 545 |
| 560 | -264 | -726 | -870 | -885 | -813 | -426 | 371 |
| 630 | -184 | -676 | -850 | -870 | -770 | -346 | 469 |
| 950 | 194 | -383 | -638 | -673 | -485 | 11 | 828 |
| 1449 | 807 | 246 | -64 | -102 | 144 | 651 | 1369 |
| 1947 | 1519 | 1094 | 817 | 778 | 998 | 1412 | 1922 |
| 2272 | 2080 | 1852 | 1681 | 1666 | 1807 | 2034 | 2294 |

(b)

Figura 4.5 - Imagem tomográfica de um tarugo de alumínio mostrando quatro furos (a), mapa de *pixels* da região demarcada na parte a

### *4.1.1 Parâmetros relacionados à operação de um tomógrafo*

***Potência:*** a potência pode ser alterada variando-se a tensão e/ou a corrente do gerador de Raios-X. Em alguns sistemas (tomógrafos médicos) o nível de tensão é fixo em 120 kV. Naqueles em que é possível variar, a tensão fica normalmente numa faixa entre 80 kV a 140 kV. A corrente elétrica pode ser variada numa faixa que normalmente vai de 50 mA a 100 mA.

***Espessura de corte:*** é a espessura varrida pelo feixe de Raios-X. É um parâmetro muito importante, pois para criar a imagem, o sistema converte as informações resultantes da varredura de um volume em um plano (imagem em duas dimensões). O valor de cada *pixel* representa a atenuação média sofrida pelo feixe no correspondente elemento de volume (voxel). Quanto menor a espessura, ou seja, quanto mais um elemento de volume tender para um elemento de área, mais próximo do ideal será o valor do *pixel* (entenda-se por ideal uma espessura infinitesimal - praticamente um plano). Portanto, espessuras menores produzem imagens mais nítidas. A Figura 4.6 é um diagrama esquemático que mostra a relação entre espessura de corte, *pixel* e voxel. Em tomógrafos médicos, essa espessura pode variar normalmente entre 0,5 mm e 10 mm.

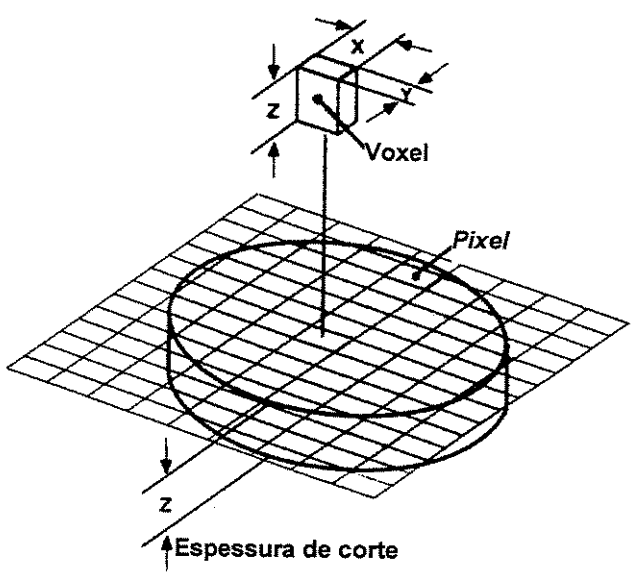



Figura 4.6 - Relação entre espessura de corte, voxel e *pixel*

***Campo de visão:*** região do *gantry* (espaço do tomógrafo onde se posiciona o objeto ou paciente) que efetivamente compõe a imagem. O campo de visão pode ser fixado de acordo com o tamanho do objeto a ser tomografado. É um recurso que permite, no caso de objetos pequenos, obter

imagens numa escala que facilite a análise. E, no caso de objetos grandes, permite reduzir o tamanho da imagem. Para tomografar a cabeça de um paciente, por exemplo, o operador seleciona um campo de visão de 25 cm. Para o caso do abdômen seleciona-se, em média, 40 ou 45 cm. O tamanho do campo de visão juntamente com o tamanho da matriz escolhida determinam o tamanho do *pixel* na imagem.

***Tamanho da matriz-imagem:*** a reconstrução da imagem resulta numa matriz de *pixels* de **n** linhas por **n** colunas. Normalmente, os aparelhos médicos apresentam três tamanhos de matriz: 128 x 128, 256 x 256 e 512 x 512 (os mais modernos já apresentam 1024x1024). Uma imagem cuja matriz tem 512 x 512 elementos apresenta 262144 células de informação (*pixels*). Existe uma relação entre o campo de visão e o tamanho da matriz na determinação do tamanho do *pixel*. Considerando o campo de visão como um círculo e a matriz um quadrado, a imagem é construída de forma a envolver todo o círculo. Portanto, a área total da imagem será a área de um quadrado cujo lado é igual ao diâmetro do círculo inscrito. Assim, fixando-se o tamanho n x n da matriz (por exemplo *512* x *512*) e, diminuindo-se o campo de visão, menor será o tamanho dos *pixels* na imagem (Figura 4.7). Desta forma, uma determinada região do objeto será representada por um número maior de *pixels*, ou seja, obtém-se uma discretização mais refinada desta região. Isto representa uma melhora no aspecto de resolução espacial da imagem.

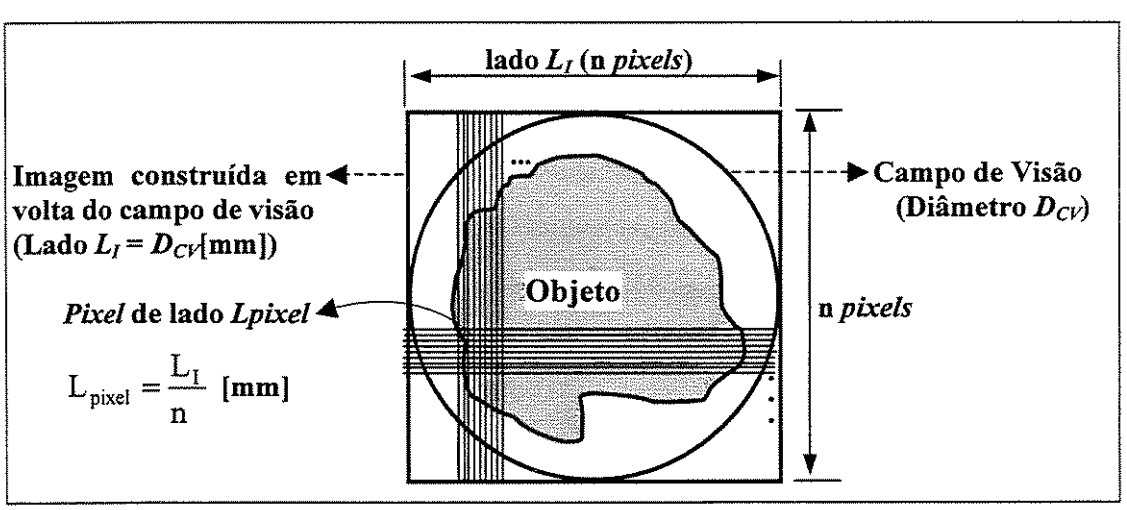



Figura 4.7 - Tamanho do *pixel* em função do campo de visão e do tamanho da matriz

### *4.1.2 Evolução dos equipamentos de tomografia de Raios-X*

O rápido desenvolvimento da informática permitiu também um rápido avanço nas configurações e nas formas de aquisição de imagens dos tomógrafos. Processadores de alta velocidade e computadores com alta capacidade de memória permitem obter e reconstruir imagens com muito mais informações (com matrizes de até 1024 x 1024 elementos) e em muito menos tempo (tanto de aquisição como de reconstrução). Porém, há várias décadas atrás, o processo de reconstrução era mais complicado e o tempo de varredura era muito mais longo, chegando até 1 hora para se obter uma única imagem.

#### *4.1.2.1 Primeira geração de tomógrafos*

Os tomógrafos da primeira geração (Figura 4.8) eram formados por um único par fonte detector. Para se obter uma imagem, movimentos de rotação e translação são combinados em várias seqüências, ou seja, o processo é repetido várias vezes até que se tenha informação suficiente. A fonte varre o objeto em movimento de translação e, em seguida, rotaciona incrementando-se em $1^{\circ}$ o ângulo de rotação do par fonte-detector e novamente varre-se o objeto, e esse processo continua até se atingirem 180 varreduras (uma a cada grau de rotação), obtendo-se uma matriz de reconstrução de 180 x 80 *pixels*.

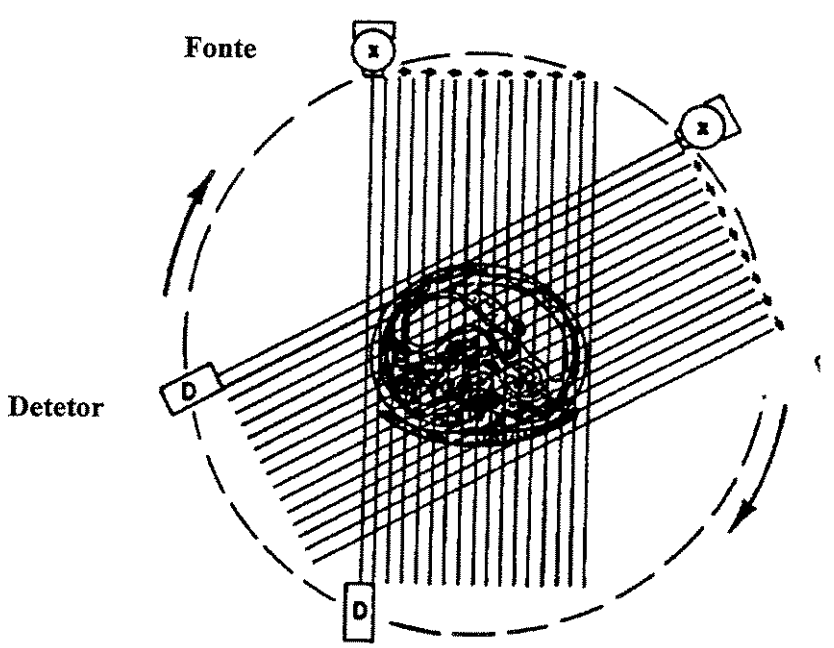



Figura 4.8 - Diagrama esquemático da primeira geração de tomógrafos

*4.1.2.2 Segunda geração de tomógrafos*

Nos tomógrafos da segunda geração, a principal evolução foi o aumento do número de detectores e a configuração do feixe de raios-x, que passou a ser em forma de leque (Figura 4.9) e não mais do tipo pincel, como era na primeira geração. Os movimentos de translação ainda continuaram, porém, devido à configuração do feixe, o incremento no ângulo de rotação após cada varredura pôde ser aumentado para cerca de 10°, de tal forma que o número de movimentos de translação caiu significativamente, diminuindo-se o tempo de aquisição, em virtude do aumento do número de detectores.

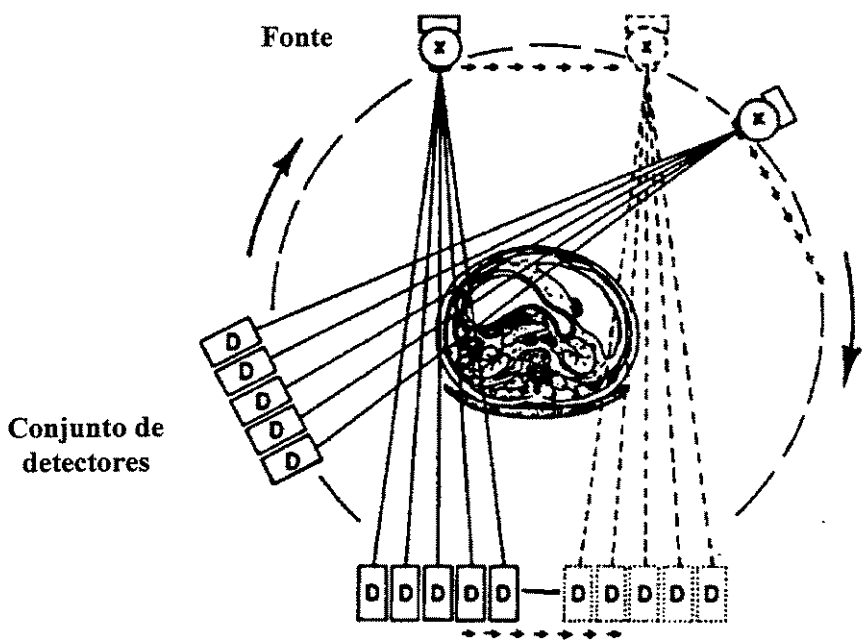



Figura 4.9 - Diagrama esquemático da primeira geração de tomógrafos

*4.1.2.3 Tomógrafos de geração superior*

Nos tomógrafos de terceira e quarta gerações (Figuras 4.10-a e 4.10-b, respectivamente), eliminou-se o movimento de translação para se obter uma imagem (há translação da mesa do paciente entre uma imagem e outra) e aumentou-se ainda mais o número de detectores. Nos de terceira geração, alargou-se o feixe em leque de forma a cobrir uma maior parte da seção do objeto. Passou-se a ter centenas de detectores arranjados concentradamente. São usados normalmente detectores de câmaras de ionização de gás xenônio. Nos de quarta geração, os detectores são fixos e dispostos em toda a circunferência de medição (*gantry*), portanto, apenas a

fonte é que gira. O custo destes últimos também aumentou, devido principalmente ao grande número de detectores (da ordem de 600 a 1200). Nestes tomógrafos de geração superior, o tempo de aquisição caiu para apenas alguns segundos.

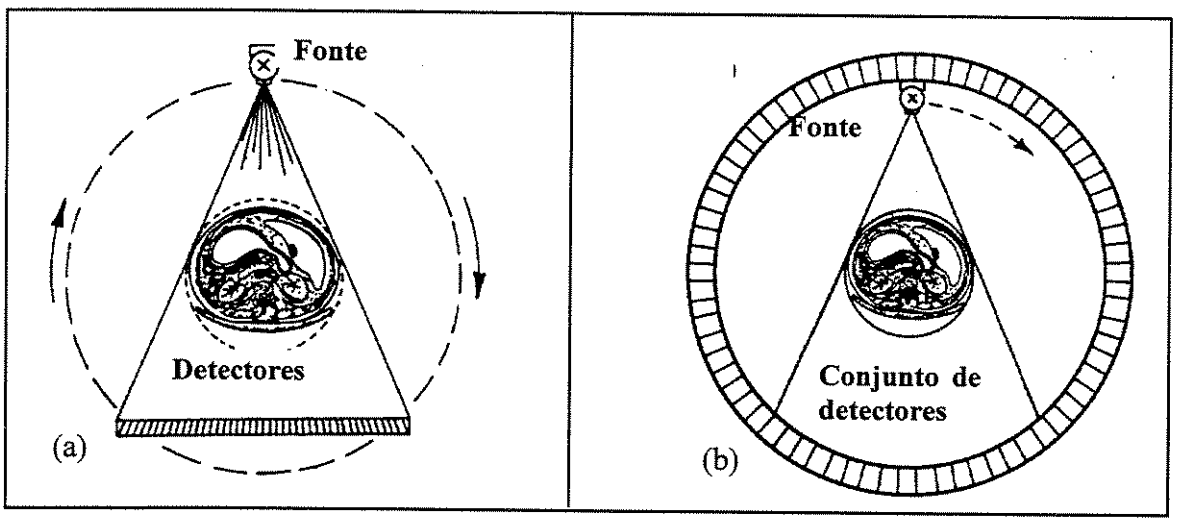



Figura 4.10 - (a) Terceira geração de tomógrafos; (b) Quarta geração de tomógrafos

Uma evolução ainda maior ocorreu com a tomografia helicoidal, conhecida também como varredura de aquisição contínua. Nesta forma de aquisição, a mesa se movimenta ininterruptamente e a varredura é feita num único passo (Figura 4.11), obtendo-se um conjunto de imagens dispostas sob a forma de uma mola, diferentemente da maneira em que a mesa translada e pára, sucessivamente, a cada imagem obtida. A obtenção da imagem se dá bem mais rapidamente, sendo possível obter até 60 imagens por minuto, ou seja, uma imagem por segundo. Normalmente esse tempo é fixo e, por causa disso, há uma grande escala de ajuste da intensidade de corrente para possibilitar intensidades adequadas de radiação. Essa grande escala de ajuste implica num gerador maior, mais versátil e com maior demanda de refrigeração. Esses aspectos tornam o sistema significativamente mais caro.

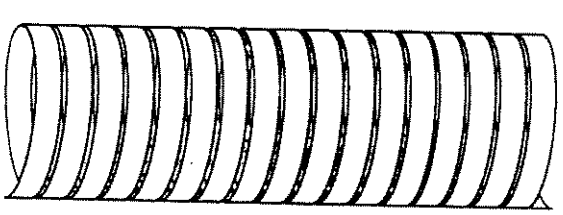


Figura 4.11 - Representação de um sistema de tomografia helicoidal

### *4.1.3 Dimensão dos objetos tomografados*

As dimensões do objeto a ser tomografado estão basicamente limitadas ao tamanho do aparelho, mais especificamente o *"gantry"*. Nos aparelhos de tomografia médica, o *gantry* apresenta normalmente um diâmetro de 70 cm. Portanto, é possível se tomografar peças de até aproximadamente 70 cm de diâmetro (ou dimensão transversal equivalente). Exemplo: um cilindro de 60 cm de diâmetro por 2 metros de comprimento. A dimensão mínima está limitada aos limites de resolução do aparelho. Normalmente, com um tomógrafo médico, é possível trabalhar-se com resolução espacial na escala de décimos de mm (ou seja, o tamanho do *pixel* na imagem). Portanto, essa resolução depende, em parte, de alguns parâmetros adotados na operação do tomógrafo sendo, basicamente, o tamanho do campo de visão e o tamanho da matriz-imagem. Outro parâmetro importante para a resolução espacial é, também, o tamanho dos detectores.

Para exemplificar, imagine-se um campo de visão de 15 cm e uma matriz de 512 por 512 *pixels*. Neste caso, o *pixel* será um pequeno quadrado cujo lado mede aproximadamente 0,3 mm (150 mm/512 *pixels*). Isso não quer dizer, porém, que seja possível obter, com boa visualização, uma imagem de um objeto de 0,3 mm de dimensão. Para se obter uma imagem possível de se visualizar razoavelmente, é necessário um diâmetro (ou um diâmetro equivalente) de pelo menos 5 mm. Em outras palavras, trabalha-se com uma resolução numa escala intermediária, que se pode chamar de mesoescala.

### *4.1.4 Materiais*

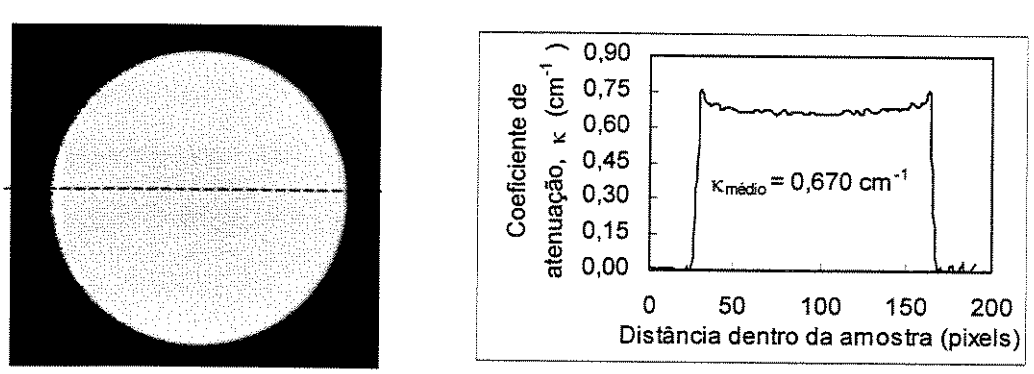
Um tomógrafo médico é projetado tendo-se em vista os materiais que compõem os tecidos do corpo humano, os quais compreendem os tecidos moles (gordura, por exemplo) e os tecidos duros (ossos). A energia utilizada é de tal ordem a não comprometer a integridade do paciente. Esta energia gira em torno de 70 keV, que é a energia próxima do centro do espectro do feixe de Raios-X quando acelerado com uma diferença de potencial de 120 kV. Os tomógrafos industriais chegam a atingir uma energia da ordem de MeV, o que significa que com esses equipamentos é possível ensaiar materiais e componentes de altíssima densidade e de grandes dimensões, como por exemplo o motor de uma aeronave ou um rotor de uma turbina a jato.

Ainda que haja uma certa limitação com relação aos tomógrafos médicos no que diz respeito à densidade dos materiais possíveis de serem ensaiados, existe uma variedade muito grande de

aplicações. Uma aplicação de destaque são os materiais compósitos, principalmente aqueles à base de carbono, bastante empregados na indústria aeroespacial e aeronáutica. Como esses materiais apresentam uma densidade próxima à do osso, consegue-se obter imagens com excelente resolução. Mas, além desses, é possível ensaiar diversos tipos de materiais: polímeros, madeira, rochas e, inclusive, alguns metais de densidade não muito alta: alumínio, magnésio e outros que apresentem densidades semelhantes a estes.

### *4.1.5 Artefatos*

Uma limitação desta técnica são os artefatos, cujo principal tipo é aquele causado pelo efeito de endurecimento de feixe e o qual está relacionado, basicamente, com o tipo de material tomografado, tratando-se, principalmente daqueles de densidade muito alta, tais como o aço. Esses artefatos corrompem a imagem e dificultam a sua interpretação, podendo mascarar detalhes importantes. O efeito de endurecimento de feixe ocorre quando fótons de menor energia são preferencialmente absorvidos, e à medida que o feixe atravessa o material, a sua energia média aumenta. Isto causa uma pseudo-diminuição do coeficiente de atenuação do material. Dependendo da geometria do objeto, os artefatos podem se manifestar em formas de sombras escuras ou de manchas brilhantes. Em um objeto de seção circular, por exemplo, forma-se um anel próximo das bordas. Na Figura 4.12-b, mostra-se o efeito típico causado pelo endurecimento de feixe. Trata-se do perfil de intensidade na posição marcada na Figura 4.12-a, apesar de que, neste exemplo, o efeito verificado não impede um leitura razoável da imagem, pois trata-se de um cilindro de alumínio, material passível de ser tomografado em tomógrafo de uso médico. Na Figura 4.5-a, por exemplo (que também é alumínio), é possível visualizar bem os quatro furos.




(a) (b)

Figura 4.12 - Exemplo de uma imagem de um tarugo de alumínio (a) e um perfil de intensidade

### *4.1.6 Procedimentos*

Em geral, o ensaio tomográfico é rápido. Para se ter uma idéia, um corte (ou uma imagem) é obtido em apenas um ou dois segundos. O tempo total de um ensaio depende, então, do tamanho da amostra.

A primeira providência, ao se realizar um ensaio de tomografia, é posicionar o objeto no *gantry* e configurar os parâmetros do tomógrafo, ou seja, o tamanho da matriz (geralmente utiliza-se 515 x 512), a espessura de corte, a distância entre um corte e outro, a tensão (em kV) e a corrente (mA). Quando o objeto ou a peça a ser tomografada for grande (uma garganta de tubeira de foguete de 450 mm de comprimento por 300 mm de diâmetro, por exemplo) é recomendável iniciar o teste com uma espessura de corte de 5 mm e uma distância entre cortes também de 5mm. A igualdade entre a espessura de corte e a distância entre eles garante que toda a peça irá ser varrida. O objetivo de se fixar uma espessura de corte não muito pequena é de se fazer uma varredura preliminar na peça, de modo a não obter um número muito grande de imagens. Se nesta primeira varredura for encontrada alguma irregularidade na peça (ou a suspeita de algum defeito), então, parte-se para uma varredura mais refinada na região de interesse, ou seja, escolhe-se uma espessura de corte menor (de preferência a menor possível) para se ganhar detalhes de visualização naquela região.

Como explicado no item 3, materiais de densidade muito alta, como por exemplo o aço, não oferecem boas condições de serem tomografados em equipamentos médicos. A energia do feixe não é suficientemente alta para esse tipo de material, para o qual são necessários tomógrafos industriais. Decorrente disso, uma das preocupações ao se ensaiar uma peça num tomógrafo médico, é verificar se a mesma contém partes de metais muito densos. Se contiver, deve-se verificar a possibilidade dessas partes serem removidas, ou a possibilidade de se tomografar a peça em planos (ou regiões de interesse) que não interceptem essas partes. Caso contrário, a imagem fica corrompida pelos artefatos. Uma roda de liga leve (roda de automóvel), por exemplo, é possível ser tomografada em um equipamento médico. Porém, deve-se remover as partes de aço (buchas de fixação) presentes na roda.

Em ensaios repetitivos, ou seja, quando a peça ou o objeto deve ser tomografada várias vezes, e, entre uma vez e outra ela é removida e depois recolocada no *gantry*, recomenda-se fazer uma marca de referência para se ter um padrão no posicionamento, tanto da peça quanto da imagem. De preferência uma marca física, um pequeno furo, por exemplo, de forma que se tenha a referência na peça e na imagem. Resumidamente, pode-se sequenciar os procedimentos da seguinte forma:

**i.** Posicionar a peça no tomógrafo;
**ii.** Ajustar os parâmetros do tomógrafo de acordo com o tamanho da peça;
**iii.** Em peças grandes, fazer uma primeira varredura com espessura e espaçamento entre cortes não muito pequenos (5 mm para os dois parâmetros é um bom valor);
**iv.** Encontrando-se regiões suspeitas no passo iii, repetir a varredura na região de interesse com espessura e espaçamento entre cortes menores (de preferência os menores possíveis), para se ganhar detalhes de visualização;
**v.** Em ensaios repetitivos que envolvem grande número de imagens, fazer uma marca de referência na peça de forma a se ter um padrão no posicionamento das imagens;
**vi.** Verificar a presença de partes de metais muito densos (aço, por exemplo). Em caso afirmativo, removê-las, se possível, ou tomografar em regiões que não contenham essas partes, para se evitarem os artefatos ou contrastes elevados;
**vii.** Em função do interesse, salvar as imagens (em fitas ou disquetes, dependendo do tomógrafo) para posterior análise e processamento.

Etapas auxiliares:

**i.** Dar um nome ao "exame" do objeto;
**ii.** Anotar a numeração de todas as imagens obtidas durante o teste e descrever sucintamente as condições nas quais cada uma delas foi obtida, ou seja, a posição da varredura na peça, os parâmetros utilizados, etc, para se ter um controle na análise posterior.

## 4.2 Aplicações de técnicas tomográficas

Diversas técnicas tomográficas têm sido aplicadas na área de engenharia. Tomografia de impedância elétrica usada no estudo de filtros de pressão (TARLETON AND HANCOCK, 1996), tomografia de luz síncroton usada no estudo de processos de saturação de meios porosos (WELLS AND DICK, 1992) e no estudo da formação de torta de filtração (BIERCK, 1988) são alguns exemplos. WANG *et al.* (1998) utilizou a tomografia de capacitância elétrica na detecção de regiões de concentração de sólidos em leitos fluidizados. Tomografia de raios-γ foi utilizada por MASSARANI *et al.* (1990) no estudo do perfil de concentração de sólidos em espessadores. Um aparelho construído à base de radioisótopos foi usado por LECH *et al.* (2000) no estudo da dispersão do tamanho de partículas em processos de obtenção de pós através de moagem. MACEDO et al. (1999) desenvolveram um equipamento de microtomografia para a análise de solos. A resolução micrométrica fornecida pelo equipamento permitiu a visualização ao nível do tamanho dos poros. Poros com até 100 μm puderam ser caracterizados com o uso da técnica. LA HEIJ *et al.* (1996) descrevem a aplicação da técnica de ressonância magnética nuclear (NMR) para caracterizar a formação da camada sólida resultante do processo de filtração. No trabalho, o autor apresenta, principalmente, o comportamento da porosidade em diversos pontos da camada sólida.

Apesar da utilização de inúmeras técnicas, a tomografia de Raios-X é uma das mais utilizadas na área de visualização, principalmente na área de processos. As vantagens desta técnica sobre as outras é a maior facilidade de acesso a equipamentos, maior facilidade de manutenção e instalação, não requerendo as sofisticadas e rigorosas exigências que outras técnicas exigem, tal como o síncroton.

Uma das aplicações na área de engenharia de petróleo pode ser encontrada no trabalho de WELLINGTON AND VINEGAR (1987). Neste trabalho, os autores descrevem o uso da técnica e apresentam exemplos de aplicação no estudo de propriedades de rochas. Na visualização do transporte de fluidos em leitos, bem como na medida do percentual das diferentes fases presentes no escoamento, encontram-se diversas aplicações (LUTRAN AND DELIKAT, 1991; TOYE *et al.*, 1994; KANTZAS, 1994; TOYE *et al.*, 1995; TOYE *et al.*, 1996; TOYE *et al.*, 1998).

LU *et al.* (1994) utilizaram a tomografia de Raios-X na análise do transporte e armazenamento de gás em folhelhos de reservatório, obtendo, também, propriedades das amostras tais como porosidade e permeabilidade. Avaliação das fases sólido-gás em processos de polimerização também é outra aplicação (KANTZAS *et al.*, 1997). A tomografia de raios-X também tem várias aplicações em análise de solo, como é o caso dos trabalhos de CHEN *et al.* (1996), PERRET, *et al.* (1997) e TOLLNER *et al.* (1998).

A eficiência de filtros eletroquímicos, construídos a base de carbono vítreo, foi estudada por MASCHIO (1997) e LANZA *et al.* (1998), utilizando-se a tomografia de raios-X. Estes filtros são utilizados na remoção de zinco e outros metais de efluentes industriais, antes destes serem descartados para o meio. A tomografia foi utilizada para o mapeamento da concentração do metal no interior do filtro, os quais eram placas de espessura de 12 mm. Foi possível verificar, pela tomografia, que a concentração ocorria predominantemente nos primeiros 3 mm da camada externa. A tomografia foi uma ferramenta que permitiu a otimização dos filtros, com relação às características geométricas, possibilitado uma economia na fabricação, bem como permitiu uma melhor configuração dos parâmetros do processo de remoção.

O objetivo desta seção não foi cobrir todas as aplicações das técnicas de tomografia (mesmo porque, estaria fora do escopo do trabalho), mas sim dar uma idéia das principais aplicações, principalmente da tomografia de raios-X.

Tabela 5.1 - Descrição do contaminante artificial utilizado nos testes

| **Nome** | *Standard Test Dust* | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Fornecedor** | *Particle Technology Ltda* | | | | | |
| **Código Fornecedor** | BS 7226/ISSO 5011 | | | | | |
| **Composição** | > 67 % $SiO_2$ | | | | | |
| **Diâmetro [μm]** | < 75 | < 40 | < 20 | < 10 | < 5 | < 2 |
| **% em peso** | 84,5 (+5,5) | 51 (+2) | 32 (+2) | 19,5 (+1,5) | 10 (+1) | --- |

Massa específica = 2650 kg/m$^3$

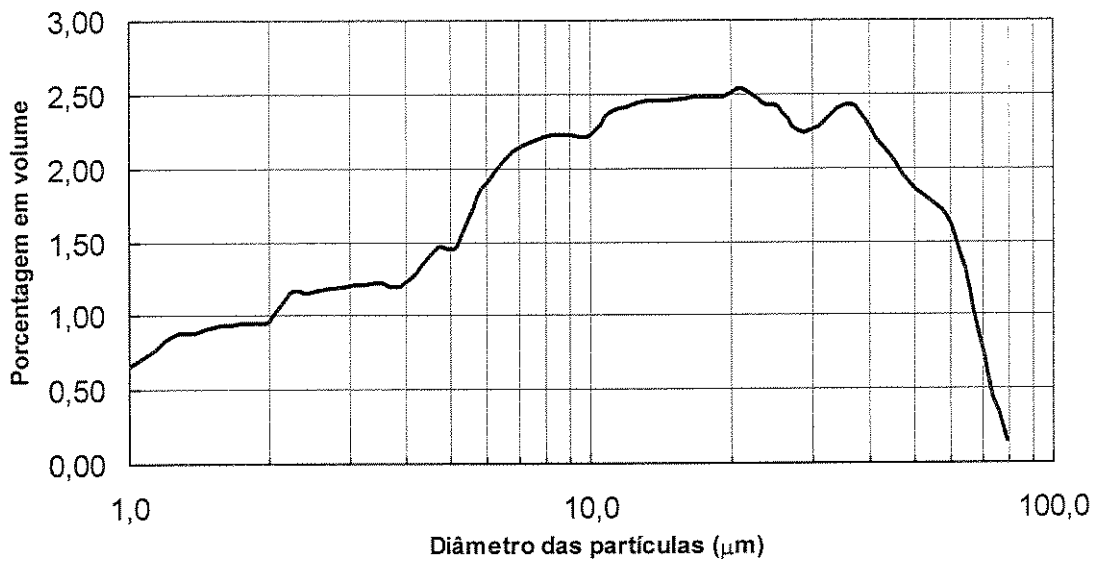


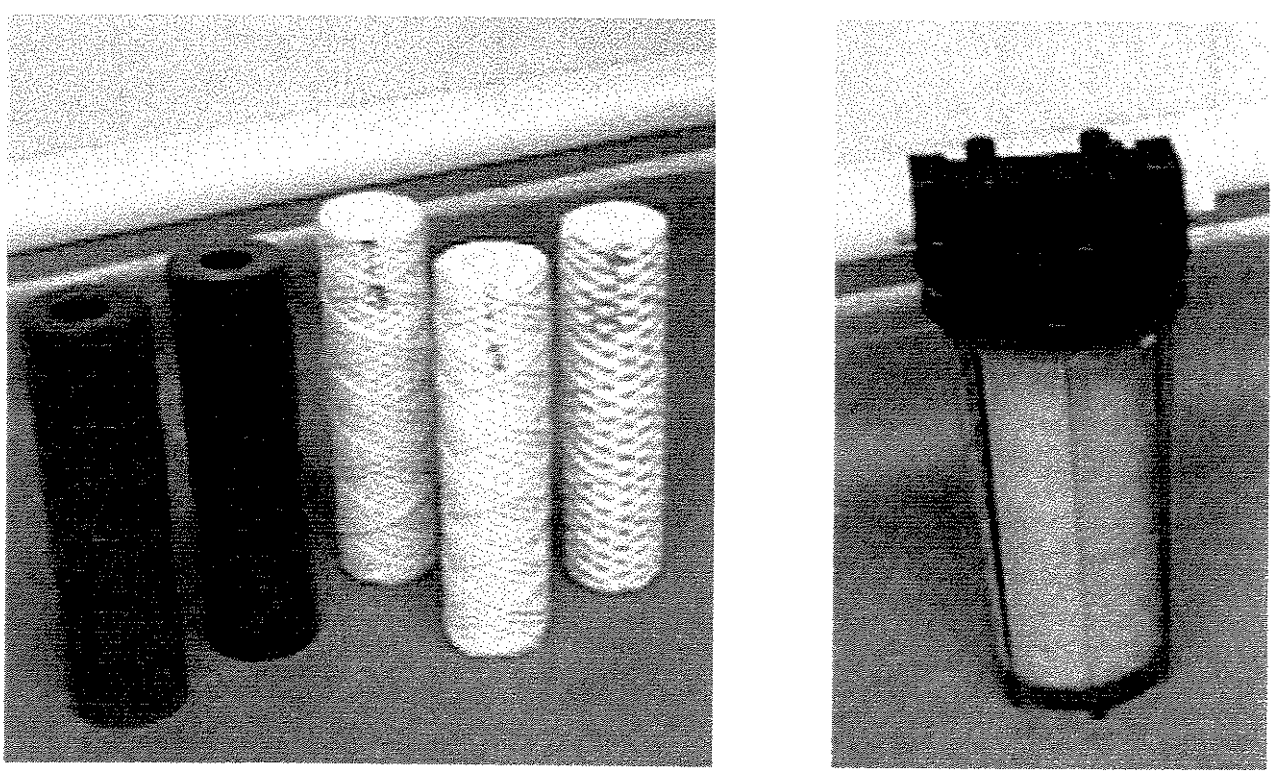

Figura 5.2 - Distribuição de partículas do contaminante

Como pode ser visto na Tabela 5.1, o range de distribuição de partículas é relativamente amplo, indo de 5 μm até 125 μm. Esta é a maneira mais comum com que este material é fornecido. Há, também, a possibilidade do fabricante fornecê-lo em uma faixa mais estreita de tamanhos, por exemplo, entre 20 μm e 25 μm. Porém, com este tipo de especificação, o material é bem mais caro.

Nesta tese, um dos objetivos foi verificar se há, realmente, um nível gradual de captura de partículas, da parte externa para a parte interna do filtro. Para isto, necessitou-se usar partículas com distribuição de tamanho homogêneo. Tendo em vista esta necessidade e o alto custo envolvido na importação do material na forma homogênea, optou-se pela classificação (ou separação) das partículas. Para tanto, utilizou-se uma máquina vibratória e uma série de peneiras granulométricas nas aberturas correspondentes aos tamanhos de partículas usados.

Para tornar o processo de separação mais eficiente, adicionava-se água às partículas brutas, ou seja, como fornecida, para aumentar seu contato com a malha das peneiras. As peneiras eram posicionadas na máquina, uma sobre a outra, em uma seqüência tal que a de maior abertura ficasse sendo, obviamente, a primeira de cima para baixo, onde eram colocadas as partículas brutas. O processo de peneiramento era repetido seguidas vezes, até que nenhuma partícula, ou praticamente nenhuma, passasse pela malha de uma peneira de maior abertura para outra subseqüente, de menor abertura. Quando isso ocorria, obtinha-se a faixa de tamanho desejada, por exemplo, entre 53 μm e 62 μm. Neste caso, a quantidade de partículas que passou na peneira de 63 μm, ficou retida na de 53 μm, até que praticamente nenhuma passasse para a de 45. Finalmente, as partículas misturadas com a água eram colocadas numa estufa para a secagem.

Os elementos filtrantes utilizados foram do tipo resinado e do tipo bobinado, mostrados na Figura 5.3 (a). Na Figura 5.3 (b) vê-se a carcaça transparente.



(a) (b)

Figura 5.3 - (a) Filtros do tipo resinado (escuros) e do tipo bobinado (claros), (b) carcaça transparente

# Capítulo 5

# Metodologia

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais utilizados no trabalho, bem como a estratégia de análise dos dados. Tem por objetivo descrever o aparato experimental, os testes de contaminação dos filtros, os contaminantes e os tipos de filtros utilizados. São apresentados, também, os procedimentos para a análise dos dados experimentais, tais como as técnicas de processamento digital de imagem, por meio da utilização do *software Khoros*, compreendendo a segmentação estratificada e a reconstrução tridimensional das seqüências de imagens. Foram realizadas simulações numéricas, a partir do modelo proposto, e foram feitas comparações com os dados experimentais.

## 5.1 Aparato experimental

Os testes de contaminação artificial dos elementos filtrantes foram realizados por meio do aparato experimental mostrado na Figura 5.1. O aparato era constituído basicamente por um reservatório, onde se adicionava o fluido juntamente com contaminante, por uma bomba, por uma carcaça instalada na linha, por controladores de vazão e medidores de pressão. Um agitador era mantido em movimento dentro do reservatório para permitir a homogeneização da mistura. A mistura do fluido com o contaminante era bombeada para o filtro em teste. A queda de pressão no filtro ($\Delta P$) era monitorizada por meio de transdutores de pressão do tipo *walydine*, instalados à jusante e à montante do mesmo. Uma linha de descarte permitia a substituição de uma mistura por outra após consecutivos testes. Para possibilitar a visualização do processo, foi utilizada uma carcaça transparente para alojar os filtros.

Ao se iniciar o bombeamento, era comum a presença de bolhas de ar misturadas ao fluido. O uso da carcaça transparente facilitou o controle da presença de ar no escoamento. Uma válvula de escape localizada na parte superior da carcaça permitia a drenagem do ar. Para se evitar a influência do ar no processo de filtração, a adição do contaminante ao fluido era feita somente quando se percebia a estabilização do escoamento, ou seja, quando a presença de bolhas não era mais notada.

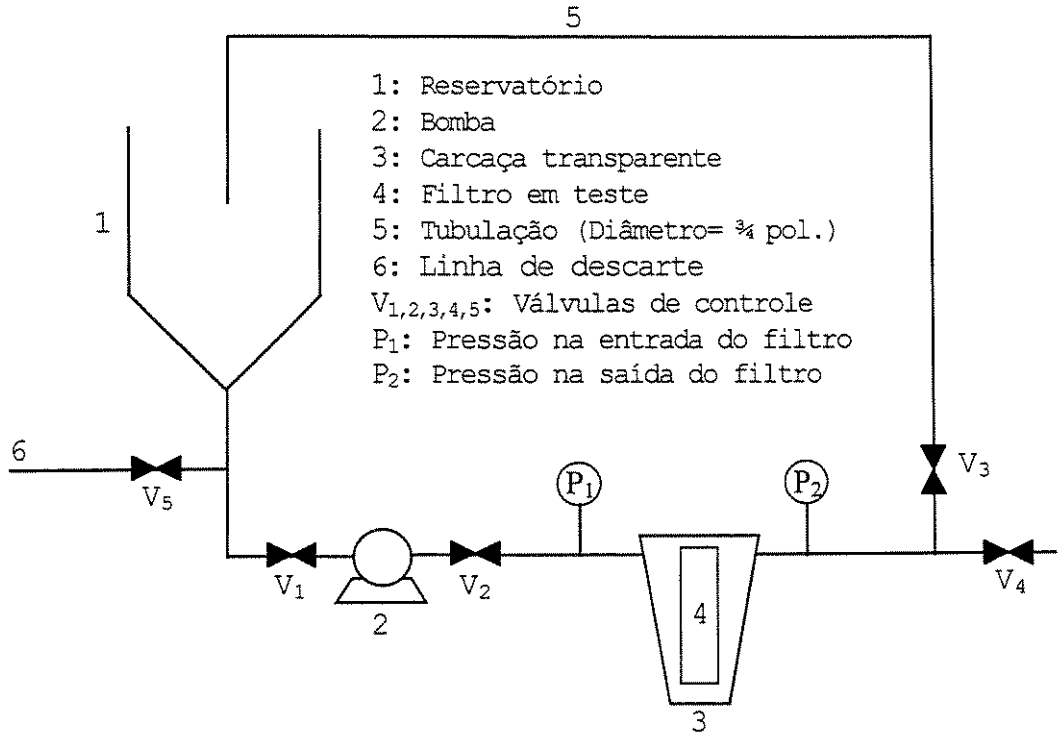



Figura 5.1 - Aparato experimental utilizado nos testes de contaminação artificial dos filtros

## 5.2 Contaminantes e filtros utilizados

Inicialmente, foram feitos alguns testes preliminares usando-se microesferas de vidro ("*glass beads*"), a fim de se verificar a viabilidade da técnica de tomografia no tipo de estudo proposto. Nos demais testes de contaminação, utilizou-se, principalmente, contaminante artificial do tipo *Standad Test Dust (Coarse)* fornecido pela *Particle Technology Ltda.* Este é um material padrão empregado em testes desta natureza e a sua descrição é mostrada na Tabela 5.1. Na Figura 5.2 mostra-se o gráfico da distribuição de partículas em porcentagem (em volume), em função do diâmetro. Pode-se observar que há uma concentração predominante entre 6 μm e 60 μm, aproximadamente, e a partir de 60 μm há um rápido declínio da concentração.

## 5.3 Testes de contaminação dos filtros

As amostras utilizadas nos testes de contaminação artificial caracterizavam-se pelas seguintes dimensões:

Diâmetro interno = 25,4 mm;
Diâmetro externo = 63 mm;
Comprimento = 248 mm.

Na tabela 5.2 encontra-se a descrição dos testes realizados.

Tabela 5.2 - Descrição dos testes realizados de acordo com o tipo de amostra

| Elementos filtrantes | | | Contaminantes | | Vazão utilizada [l/min] |
|---|---|---|---|---|---|
| Amostra | Tipo | Capacidade de retenção [μm] | Concentração [g/l] | Diâmetro [μm] | |
| 1 | Bobinado | 50 | 1,0 | 37 a 44 | 20 |
| 2 | Bobinado | 50 | 1,0 | 45 a 53 | 20 |
| 3 | Bobinado | 50 | 1,0 | 62 a 74 | 20 |
| 4 | Resinado | 50 | 1,0 | 37 a 44 | 20 |
| 5 | Resinado | 50 | 1,0 | 45 a 53 | 20 |
| 6 | Resinado | 50 | 1,0 | 62 a 74 | 20 |
| 7 | Resinado | 50 | 1,0 | 1 a 74 | 20 |
| 8 | Bobinado | 50 | 1,0 | 1 a 74 | 20 |
| 9 | Bobinado | 30 | 1,0 | 25 a 32 | 20 |
| 10 | Bobinado | 30 | 1,0 | 25 a 32 | 40 |
| 11 | Bobinado | 30 | 1,0 | 25 a 32 | 60 |
| 12 | Bobinado | 50 | 1,0 | 45 a 53 | 20 |
| 13 | Bobinado | 50 | 1,0 | 45 a 53 | 20 |

## 5.4 Ensaios tomográficos

Após os testes de contaminação, os elementos eram levados para a estufa para se efetuar a sua secagem. O objetivo era evitar a presença de água nos filtros durante os ensaios tomográficos, otimizando-se, assim, o contraste entre as partículas contaminantes e o material do filtro.

Nos ensaios tomográficos utilizou-se um tomógrafo médico de quinta geração, modelo *X-Series*, da marca *TOSHIBA*. Os parâmetros relativos à fonte de Raios-X, ou seja, a tensão de alimentação do tubo e a corrente, foram configurados em 120 kV e 80 mA.s, respectivamente. A espessura da fatia foi ajustada em 3 mm e, para se evitar defasagens entre duas fatias consecutivas, o deslocamento da mesa do tomógrafo foi ajustada igualmente em 3 mm. O tempo de varredura de cada fatia foi ajustado para 3 segundos. Na reconstrução das imagens, usou-se a matriz com maior números de *pixels* (512 x 512), a fim de se obter a melhor resolução espacial do aparelho. A resolução espacial depende, também, do tamanho do campo de visão dentro do qual a imagem é construída. Portanto, a resolução espacial da imagem fica definida em função do diâmetro do campo de visão e do tamanho da matriz. O diâmetro dos filtros era de aproximadamente 63 mm. Desta forma, o campo de visão foi configurado em 65 mm, resultando em uma resolução espacial de 0,127 mm/*pixel*. A configuração destes parâmetros foi mantida em todos os ensaios.

## 5.5 Tratamento das imagens

A única saída para arquivos do tomógrafo utilizado era um driver para disquete de $3^{1/2}$ polegadas. Após cada seção de tomografia, gerando em média 100 imagens por seção, estas eram transferidas para os disquetes. Cada imagem ocupa 512 kB de espaço em disco, o que significa somente duas imagens por disquete. Em seguida, os arquivos eram transferidos para um microcomputador e, via FTP, transferidos para uma estação de trabalho para posterior análise e processamento. Para o processamento das imagens, usou-se o *software Khoros*, que utiliza um sistema de programação visual sob a interface *cantata*.

### *5.5.1 O software Khoros e o ambiente cantata*

O *Khoros* é um software que incorpora mais de 300 programas (ou rotinas), implementados em linguagem C e C++, destinados a aplicações na área de processamento digital de imagens. Através deste pacote, é possível implementar algoritmos específicos para cada aplicação em particular. Dentre as várias possibilidades de aplicação, pode-se citar: operações aritmética entre imagens, classificação e extração de padrões e característica de interesse (distribuição de tamanhos de peças, por exemplo, sugerindo aí uma aplicação industrial), restauração e melhoramento de imagens, ferramentas estatísticas específicas para análise quantitativa de imagens, ferramentas de visualização, como reconstrução tridimensional, etc.

Para o processamento de imagens no *Khoros*, deve-se utilizar arquivos de entrada com o formato "KDF" (*khoros* data format), próprio do programa. Porém, é possível trabalhar com outros formatos, tais como os mais conhecidos do tipo "TIFF", "BMP", etc. Para isso, existem rotinas apropriadas de conversão de arquivos que permitem converter um determinado tipo para o formato KDF. Uma das mais importantes é a rotina "*Import Raw*", pois permite a conversão de arquivos com formatos mais desconhecidos, como por exemplo, um formato específico de uma determinada marca de tomógrafo.

O *cantata* é um ambiente de programação visual, cuja tela principal está mostrada na Figura 5.4. Sua principal característica é possibilitar a interconexão de módulos de processamento (operadores). Um conjunto de operadores interligados convenientemente forma um *workspace*. O fluxo de dados em um *workspace* é feito por meio das ligações entre uma rotina e outra. Cada rotina apresenta pelo menos uma porta de entrada (que recebe os dados de entrada) e pelo menos uma porta de saída, que libera os dados resultantes do processamento para o próximo bloco. A inserção de dados é feita abrindo-se o operador através da alça superior esquerda (em forma triangular). A execução de cada rotina é feita pressionando-se o quadrado interno do operador, que muda de cor durante o processamento, para facilitar o gerenciamento da execução global do *worhspace*. Um *workspace* pode ser executado passo a passo, acionando-se uma rotina por vez (obedecendo a ordem), ou pode ser executado automaticamente pelo comando "*run*", disponível na barra de ferramentas principal.

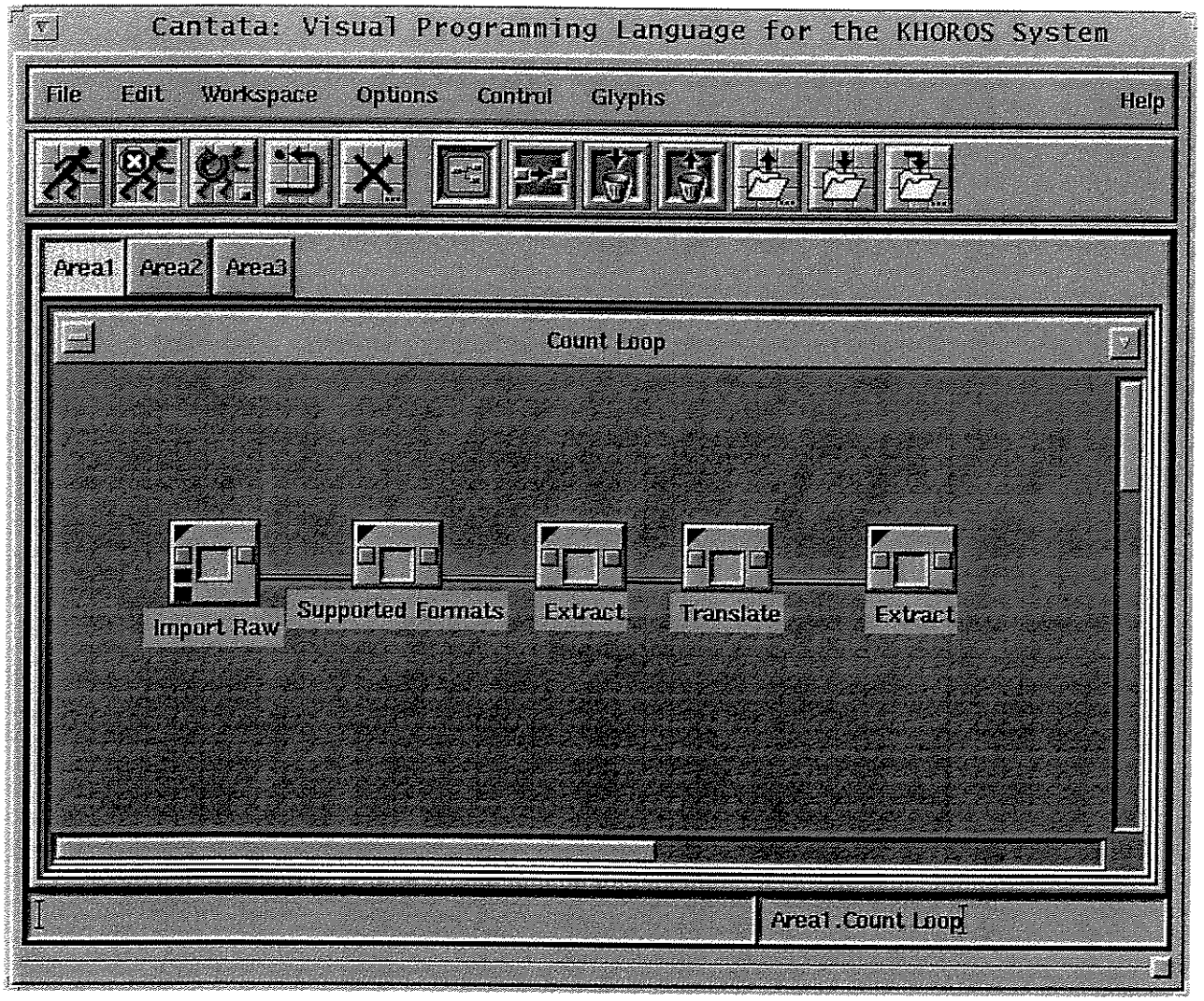



Figura 5.4 - Tela do ambiente *cantata* mostrando um *workspace* desenvolvido para a importação das imagens tomográficas

### *5.5.2 Pré-processamento das imagens*

Este trabalho envolveu a manipulação de uma grande quantidade de imagens e foi necessário desenvolver alguns procedimentos automáticos para esta manipulação. A primeira etapa era ler as imagens, já transferidas para a estação de trabalho, e convertê-las para o formato do *Khoros*. Esta conversão foi realizada utilizando-se a rotina *"Import Raw"*, onde a entrada de dados era feita através de um contador implementado no próprio ambiente do cantata. O contador era incrementado de um em um até o número final de imagens correspondentes a uma dada seqüência. A cada incremento, gerava-se um novo arquivo, nomeado automaticamente e já no formato do *Khoros*.

O segundo passo (antes do início do processamento das imagens propriamente dito) era a extração da região de interesse (região referente ao filtro) e a verificação do alinhamento entre elas em cada seqüência correspondente a cada um dos filtros tomografados. Em caso de um desalinhamento (esquematizado na Figura 5.5), provocado por um eventual desvio entre o eixo longitudinal do filtro e o eixo longitudinal da mesa do tomógrafo, era necessária uma correção para enquadrar todos as imagens. Esta correção era feita aplicando-se um algoritmo que deslocava cada imagem para cima ou para baixo, e/ou para a esquerda ou para a direita, conforme a geometria do desalinhamento, de tal forma que todas ficassem numa mesma posição dentro da região delimitada na imagem.

Na Figura 5.5, "*a*" representa um deslocamento em y, referente à primeira imagem; enquanto "*b*" representa o deslocamento em y, referente à última imagem. Para promover um deslocamento para cima ($d^i_y$), de forma a tangenciar as imagens em relação ao eixo que passa em y = 0, a seguinte equação (Equação 5.1) era aplicada:

$$d_y^i = -\left[\left((b-a)\frac{i}{n}\right)+a\right] \tag{5.1}$$

onde i refere-se à posição da imagem, dentro da seqüência de 1 a n, sendo que n refere-se ao número de imagens da seqüência. O sinal negativo significa um deslocamento contrário à orientação do eixo y. O mesmo procedimento é aplicado em relação ao eixo x. Durante o processo de alinhamento já se realizava uma nova extração, obtendo-se uma seqüência de arquivos, correspondentes a cada nova imagem, conforme esquematizado na Figura 5.6.

Após a etapa de conversão, de extração e de alinhamento, criava-se um único arquivo, representado esquematicamente na Figura 5.7, contendo todas as imagens de uma determinada amostra (filtro). Este arquivo correspondia a uma imagem multidimensional, caracterizada, basicamente, por três dimensões: largura (w), altura (h) e profundidade (d), sendo esta última referente ao número de imagens (n) da seqüência considerada. O principal objetivo de se criarem estes arquivos era possibilitar a reconstrução tridimensional dos filtros tomografados, além de facilitar o gerenciamento e análise quantitativa das imagens. Para gerar essas imagens multidimensionais, utilizou-se basicamente o operador "*Append*", do *Khoros*.

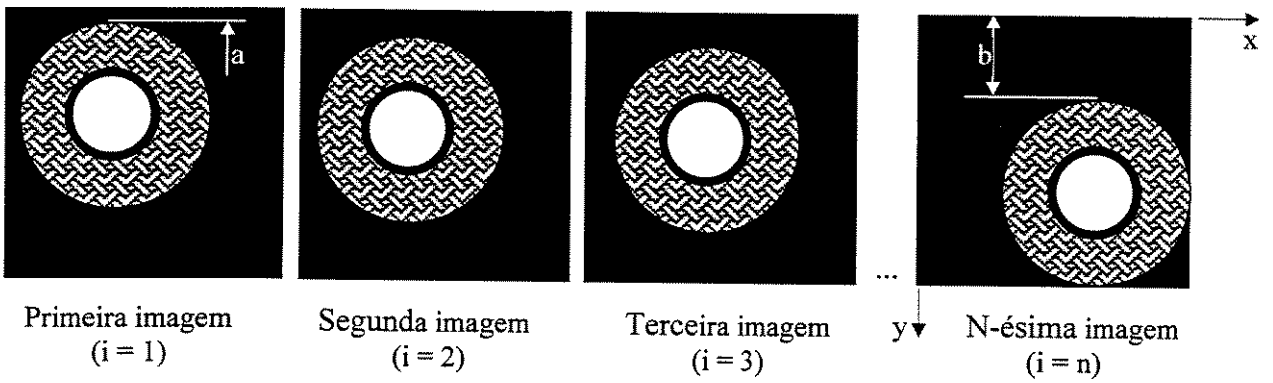



Figura 5.5 - Esquema da seqüência das imagens originais apresentando um desalinhamento na direção vertical e na direção horizontal

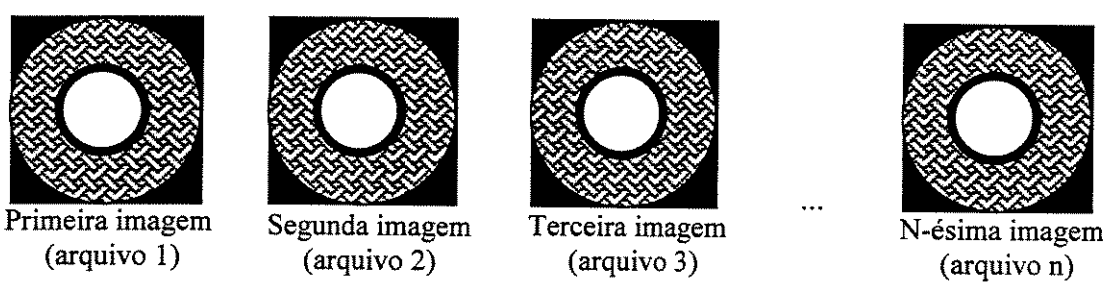



Figura 5.6 - Esquema da seqüência das imagens originais após o alinhamento e uma nova extração

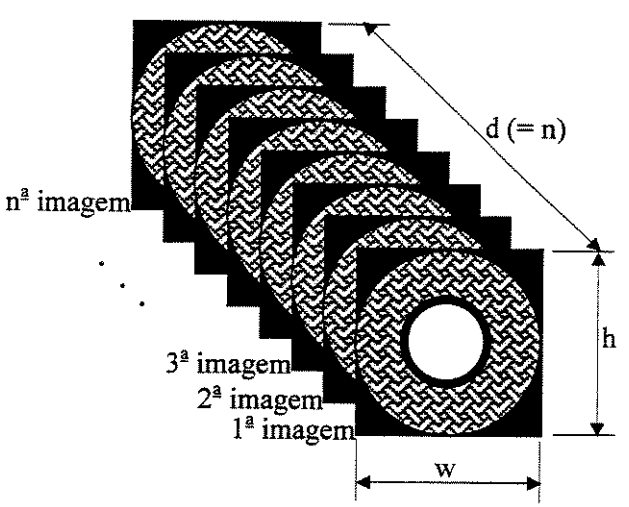



Figura 5.7 - Representação esquemática de um arquivo contendo todas as imagens de um filtro

## 5.6 Estratégia de análise dos dados experimentais

Uma vez obtidos os arquivos multidimensionais, resultantes das fases de pré-processamento, as próximas etapas compreendem várias estratégias de análise, envolvendo: análise estatística, reconstrução tridimensional, etc.

### *5.6.1 Detecção do contaminante*

Usou-se o significativo contraste entre o material do filtro e o contaminante como estratégia para a detecção da presença de partículas em um determinado *pixel*. Vale lembrar que no caso de um contaminante com menor coeficiente de atenuação, como por exemplo materiais orgânicos, partículas poliméricas, etc, é necessário um procedimento mais cuidadoso para a calibração do tomógrafo, para se definir melhor o critério para a detecção do contaminante, bem como a determinação do nível mínimo de contaminante possível de ser detectado. Neste trabalho, o CT dos filtros limpos utilizados estava em torno de -750 H e o CT do contaminante estava em torno de 600 H. Mesmo tendo sido feita a secagem das amostras contaminadas, considerou-se a possibilidade da presença de alguma quantidade de água (CT $\cong$ 0 H) no filtro. Admitindo-se uma tolerância de $\pm$10 H inerente ao tomógrafo, foi considerado o valor 10 H como limiar para se decidir se um determinado *pixel* acusava ou não a presença de contaminante.

### *5.6.2 Segmentação estratificada e análise estatística das imagens*

Neste trabalho, desenvolveu-se uma metodologia de análise estatística do conjunto de imagens obtidas para cada filtro. Trata-se de uma estratégia de segmentação da imagem para selecionar os *pixels* de interesse, ou seja, aqueles que acusem a presença de partículas. A segmentação, de uma forma geral, é aplicada globalmente em uma imagem, e envolve basicamente a escolha de um nível de intensidade dos *pixels* (números CT), ou seja, um valor que atue como fronteira na classificação dos *pixels* contendo partículas e dos *pixels* que não contém partículas. Em linguagem de processamento de imagens, este valor é conhecido como *threshold.*

No desenvolvimento da segmentação estratificada, criou-se uma seqüência de máscaras circulares, em forma de anéis. Para se obter o maior nível de resolução possível, cada máscara foi configurada com uma espessura de 1 *pixel*, que é a menor medida em uma imagem. O número de máscaras, para cada imagem depende, portanto, da espessura do filtro, em *pixels*. Por sua vez,

esta espessura depende da resolução espacial usada durante os experimentos tomográficos. No caso deste trabalho, a espessura (física) dos filtros resultou em uma espessura, na imagem, de 36 *pixels*, ou seja, 36 máscaras para cada *slice*. Na Figura 5.8 apresenta-se um diagrama esquemático com a forma de aplicação das máscaras na seqüência de *slices* e, na Figura 5.9, apresentam-se alguns exemplos de máscaras.

Para se encontrar o número de *pixels* em cada região anelar delimitada pelas máscaras, montou-se um conjunto de operadores, no *Khoros*, formando um *workspace* (Figura 5.10). Portanto, numa seqüência de 80 imagens (equivalente a um filtro), deve-se resolver um montante de 2880 *workspaces*. No *Khoros*, foi possível o desenvolvimento de algoritmos que executassem a seqüência de *workspaces* automaticamente. Uma das estruturas de controle usada para a automatização foi o "*Count Loop*". Este operador controla a execução de uma seqüência de operações, cuja indexação é feita por meio de uma variável do tipo inteiro. Pode-se executar o operador "*Count Loop*" na forma de enlaces, ou seja, uns internos aos outros. O *workspace* mostrado na Figura 5.10, por exemplo, faz parte de um *loop* duplo, sendo que o primeiro incrementa o número de *slices*, e o segundo incrementa o número de máscaras.

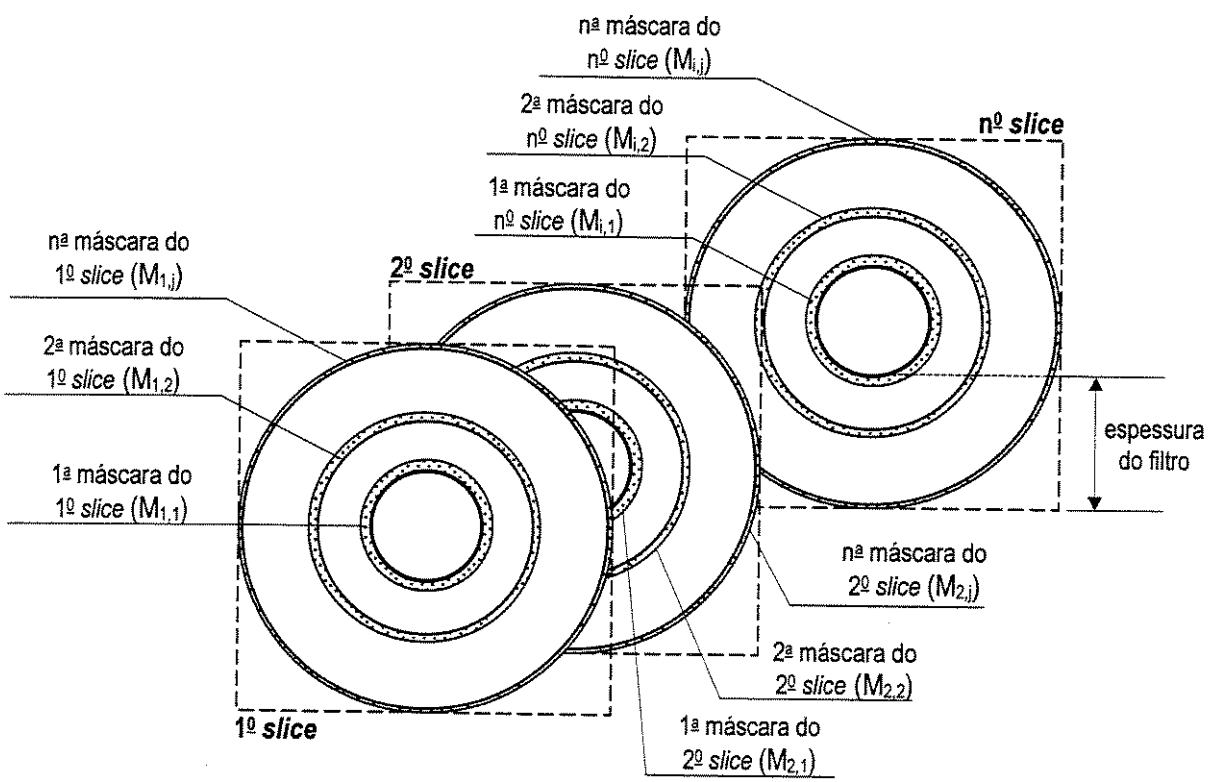



Figura 5.8 - Diagrama esquemático da aplicação da segmentação estratificada na seqüência de imagens: total de máscaras = espessura do filtro (em *pixels*) x número de *slices* (i x j)

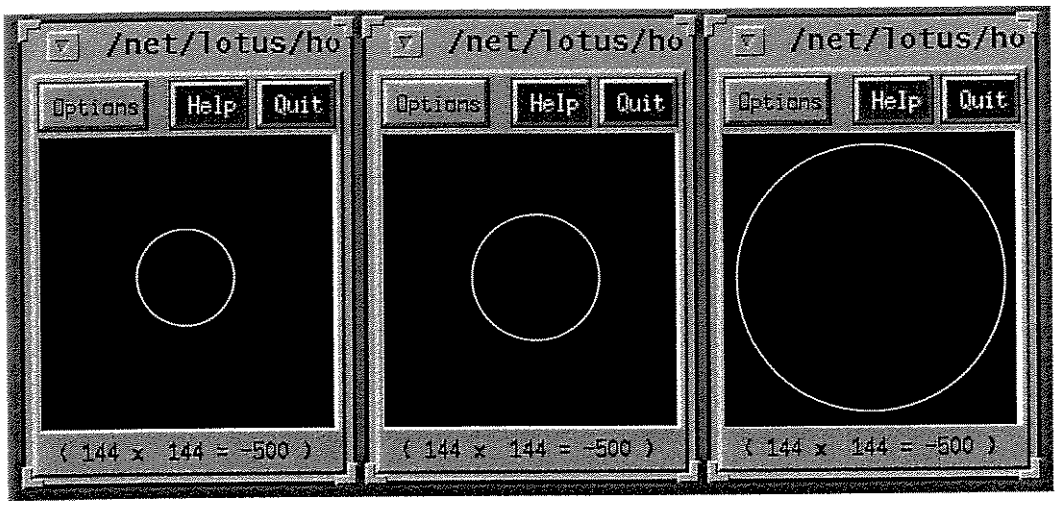



Figura 5.9 - Exemplos de máscaras na forma de anéis

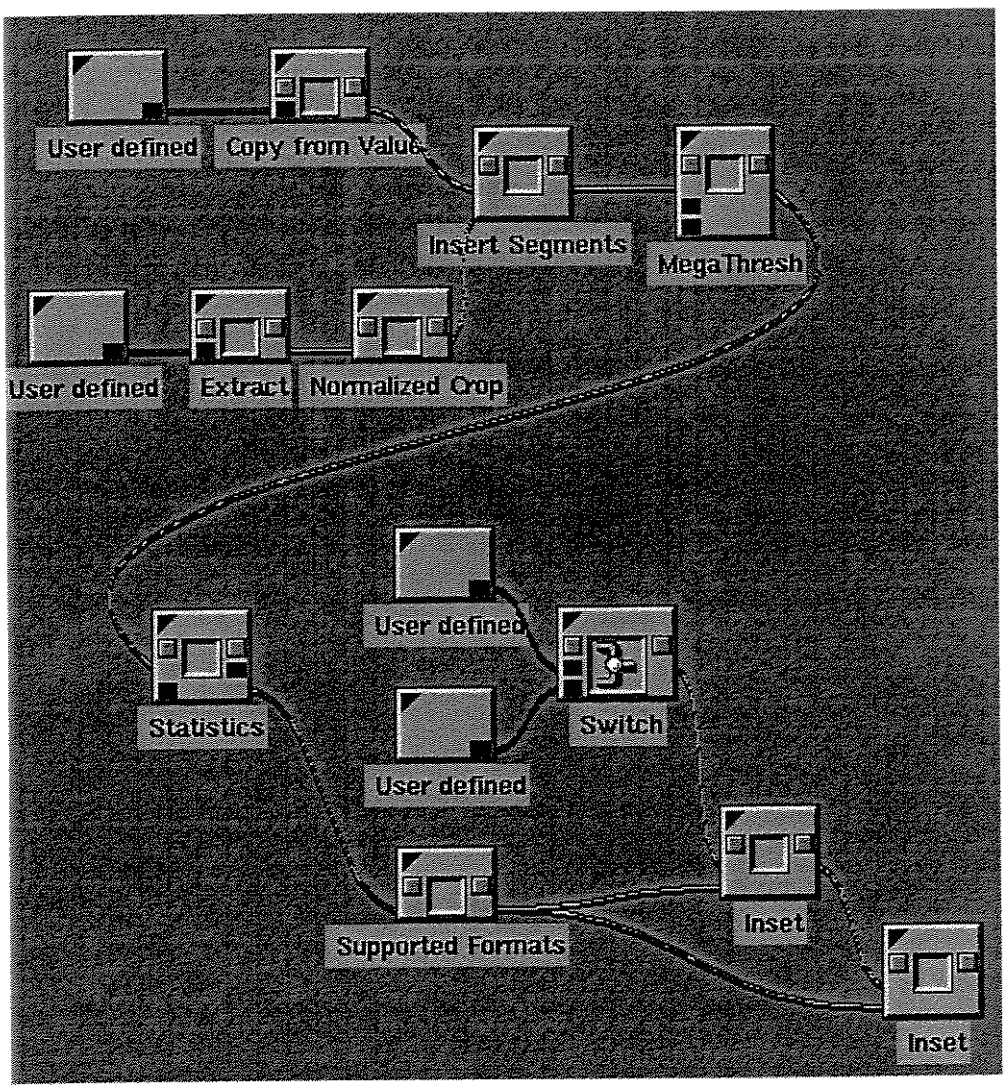



Figura 5.10 - *Workspace* implementado no *Khoros* e destinado ao processo de segmentação estratificada

### *5.6.3 Reconstrução tridimensional*

A reconstrução tridimensional foi um recurso utilizado para permitir e facilitar a visualização dos dados tomográficos. Este recurso permitiu modelar espacialmente os filtros contaminados e analisar a distribuição (espacial) dos contaminantes neles retidos. Esta estratégia possibilitou a análise global de toda a seqüência de imagens, mostrando o gradiente de profundidade atingido pelas partículas e o tipo característico de aglomerados formados nas diferentes situações dos experimentos, ou seja, em função do tamanho de partículas, velocidade (ou vazão) de escoamento do fluido, tipo de filtro, etc.

No processo de reconstrução, procedeu-se à seleção de três regiões dos filtros: uma região interna, uma intermediária e uma externa, com o objetivo de facilitar a visualização. Desta forma, para cada filtro, três imagens tridimensionais foram obtidas.

Para a obtenção das imagens tridimensionais, foi necessária a aplicação de máscaras, de forma a isolar as regiões de interesse nas imagens. Portanto, para cada seqüência, três diferentes máscaras foram aplicadas em todos os *slices*. A Figura 5.11 ilustra a delimitação das regiões interna, intermediária e externa, correspondentes ao *slice* mostrado.

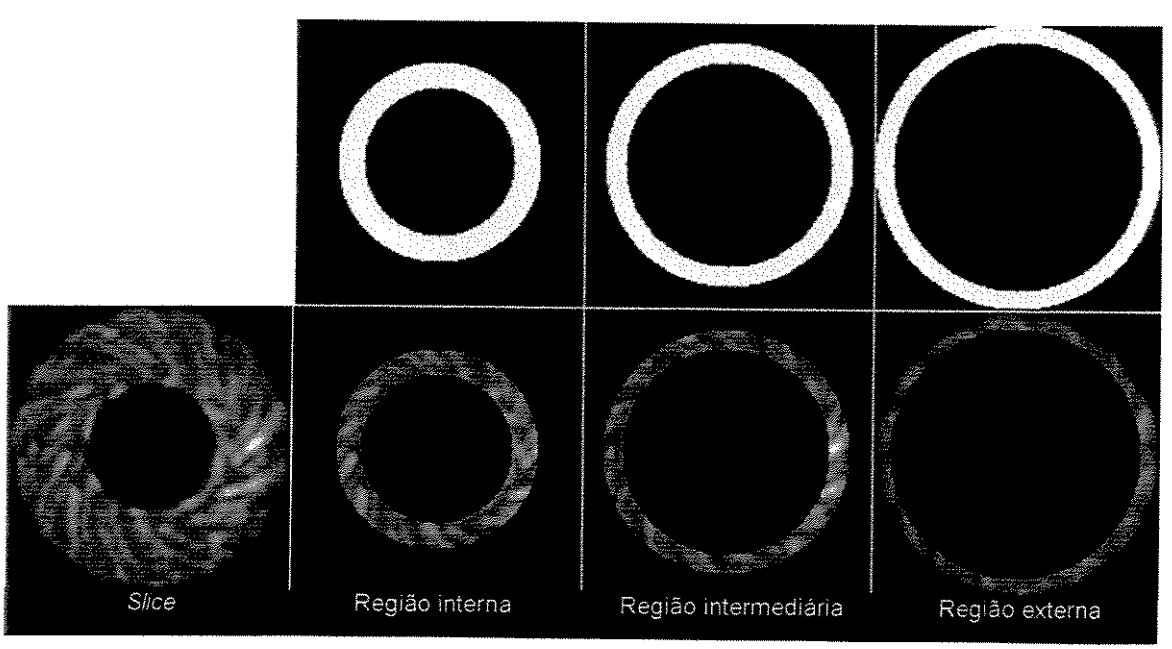



Figura 5.11 - Aplicação de máscaras para a reconstrução tridimensional dos filtros em diferentes regiões

Na Figura 5.12 pode-se ver o exemplo de um dos *workspaces* usados para a reconstrução tridimensional das imagens. Na Figura 5.13-a, aparece a implementação da rotina "*Count Loop*", usada para aplicar as máscaras em cada um dos *slices* de cada seqüência de imagens e, na Figura 5.13-b, aparece a implementação da rotina "*Procedure*", usada para sequenciar os *slices* com as máscaras.

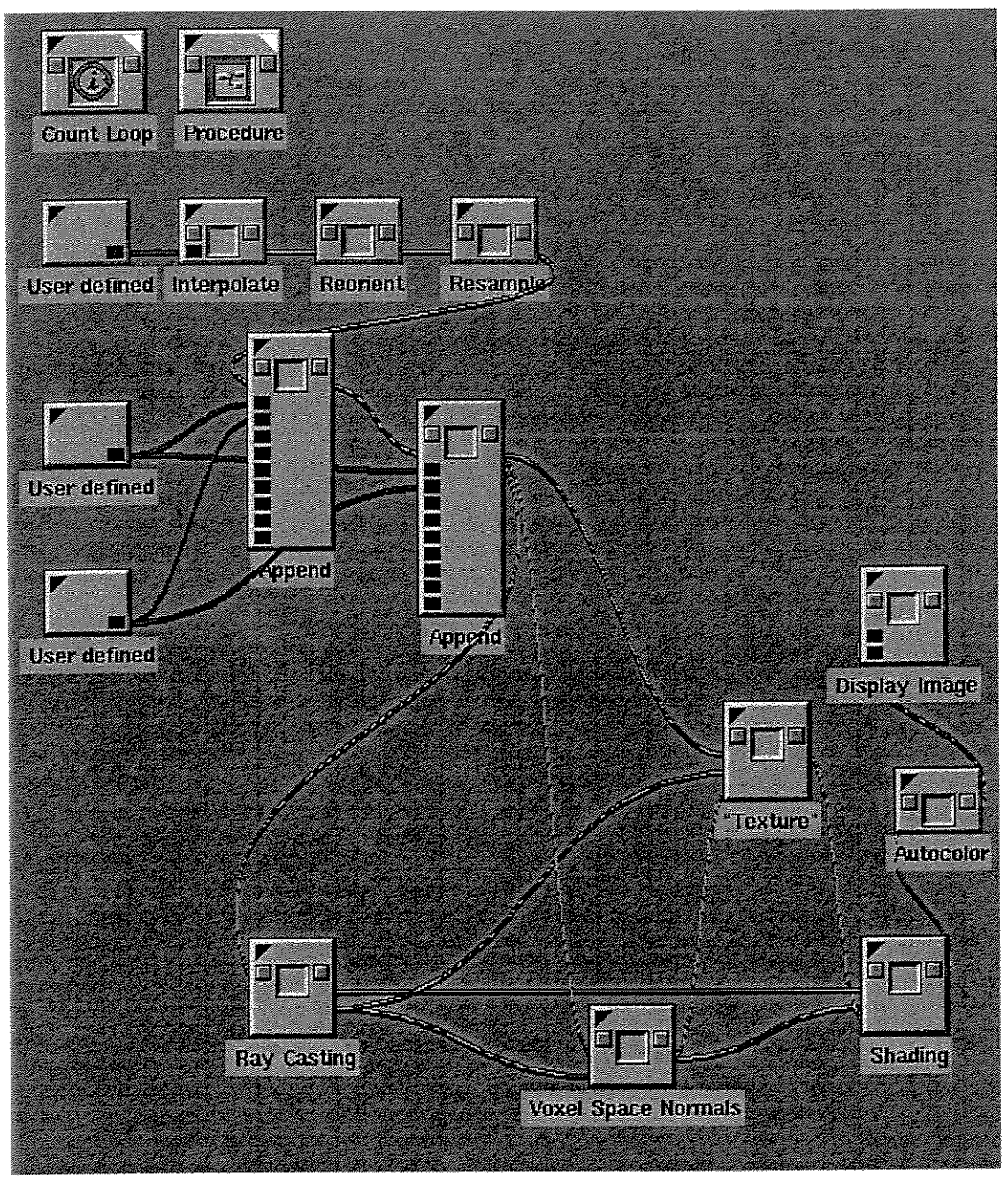
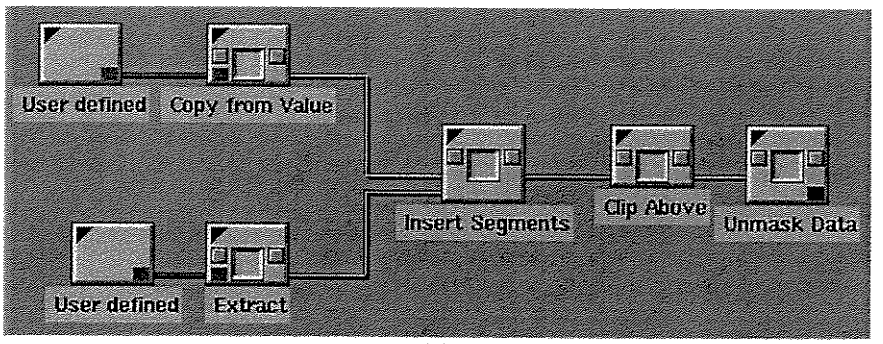
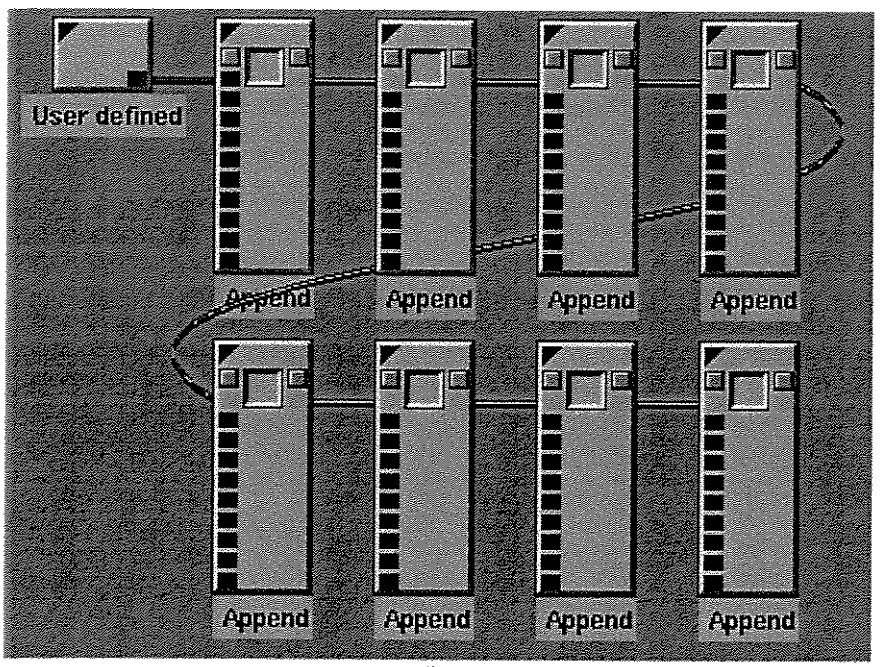



Figura 5.12 - Exemplo de um dos *Workspaces* implementados no *Khoros* para a reconstrução tridimensional das imagens




(a)




(b)

Figura 5.13 - *Workspaces* para a implementação das rotinas *Count Loop* (a) e *Procedure* (b)

# Capítulo 6

# Resultados e Discussão

Este capítulo está dividido em três partes básicas. A primeira constitui-se de uma parte introdutória sobre a aplicação da técnica de tomografia, ou seja, a análise preliminar. A segunda refere-se à apresentação e discussão de alguns casos experimentais, onde se analisam os dados obtidos via tomografia, utilizando-se a estratégia de análise por meio de processamento de imagens, tais como a reconstrução tridimensional e a análise estatística, como por exemplo, a utilização do processo de segmentação estratificada, desenvolvido no ambiente *cantata*, através do *Khoros*, e que permitiu a modelagem da distribuição de contaminantes no filtro. A terceira parte trata da aplicação do modelo numérico, através da simulação de diversos casos, com vistas à análise de sensibilidade do mesmo. Trata, também, da comparação de dados resultantes da simulação numérica com dados obtidos experimentalmente, através da tomografia. Por fim, faz-se uma avaliação da parte hidrodinâmica dos filtros, pela análise das curvas de vazão *versus* queda de pressão nos elementos sem contaminante, calculando-se o fator de forma para cada tipo de filtro.

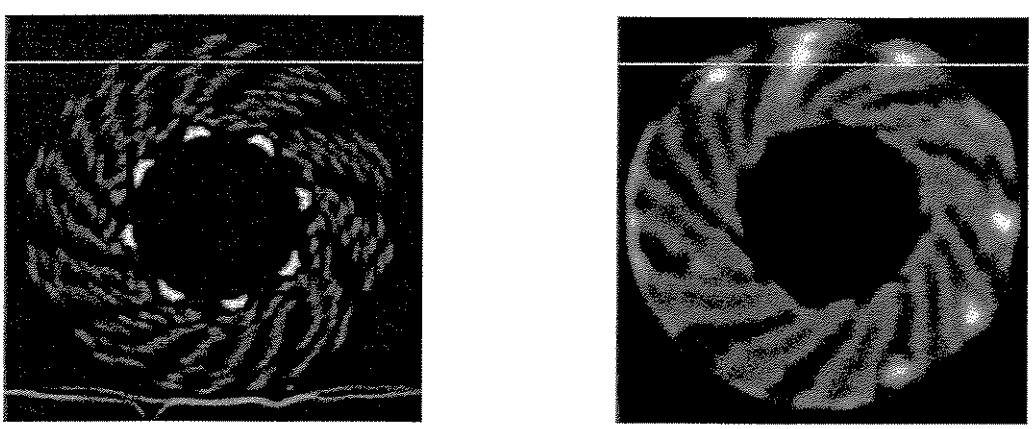
## 6.1 Análise preliminar

Nesta seção apresentam-se inicialmente algumas imagens tomográficas, bem como sua análise, com o objetivo de se ilustrar a aplicação da tomografia computadorizada de Raios-X no estudo proposto nesta pesquisa. Pretende-se mostrar, de uma forma geral, a viabilidade da técnica na detecção de contaminantes, apresentando, por meio das imagens, a definição do contraste entre o sólido retido e a estrutura do filtro. Também se apresenta a viabilidade da técnica na detecção de defeitos em filtros.

Nas seções posteriores serão apresentadas análises mais detalhadas, como por exemplo, a análise do processo de filtração em relação à quantidade de contaminante e em relação à profundidade atingida no filtro, verificação da capacidade gradual de retenção de alguns filtros; forma dos aglomerados, quantidade de material retido, níveis de profundidade, em função da velocidade (ou vazão) do fluido durante o processo de filtração.

### *6.1.1 Detecção do contaminante*

Na Figura 6.1 mostra-se duas imagens, sendo que a primeira (a) corresponde a um filtro virgem e a segunda (b) corresponde ao mesmo filtro contaminado. Na Figura 6.1-b, pode-se ver claramente o alto contraste entre o material contaminante e o material que compõe o filtro, ou seja, as fibras. Este alto contraste deve-se à grande diferença entre o nível de atenuação causado pelas fibras, o qual produz números CTs em torno de -750 H, e pelo contaminante, o qual produz números CTs em torno de 500 H. Na Figura 6.2, apresenta-se o gráfico correspondente às linhas indicadas na Figura 6.1-a e 6.1-b. Analisando o perfil mostrado neste gráfico, pode-se ver os picos de intensidade relativos aos aglomerados formados pelas partículas contaminantes.



(a) (b)

Figura 6.1 - Exemplos de imagens tomográficas de um filtro virgem (a) e do mesmo filtro contaminado (b)

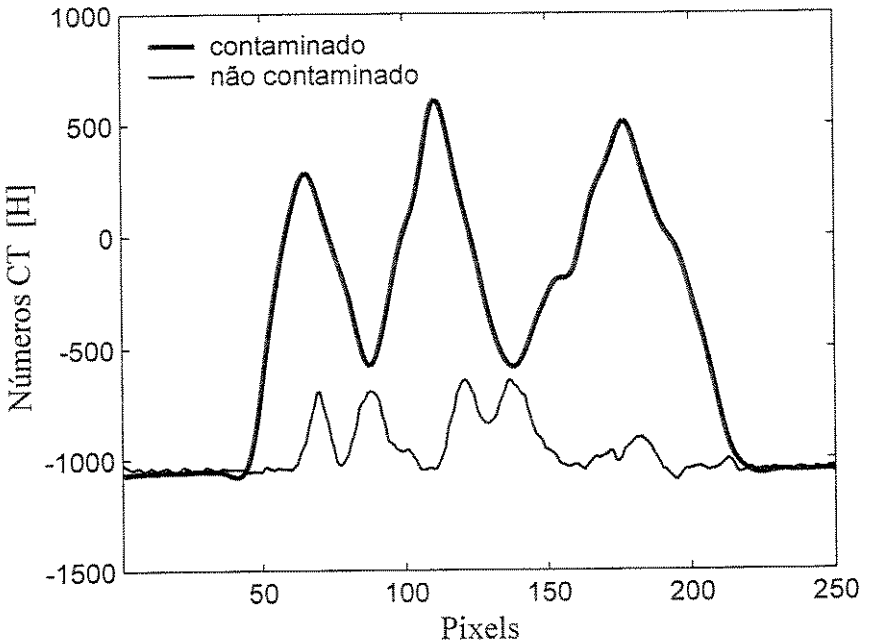



Figura 6.2 - Gráfico correspondente aos perfis indicados na Figura 6.1

### *6.1.2 Defeitos em filtros de carbono ativado*

Uma aplicação importante da técnica de tomografia, proposta nesta pesquisa, é a detecção e caracterização de defeitos em filtros. A Figura 6.3 apresenta uma seqüência de imagens de um filtro de carbono ativado. Em todas as imagens é possível a visualização de uma fratura de grande extensão, sendo possível ver, também, uma cavidade próxima à borda do filtro. O contraste apresentado deve-se ao baixo nível de atenuação causado pelas regiões do defeito, basicamente preenchido por ar. Também nota-se a presença de inclusões, em tons mais claros nas imagens. Na Figura 6.4 mostra-se os defeitos vistos na primeira imagem da seqüência apresentada na Figura 6.3, reconstruídos de forma gráfica. O gráfico 3D mostra os picos de atenuação referente às inclusões presentes no filtro e vistas nas imagens tomográficas.

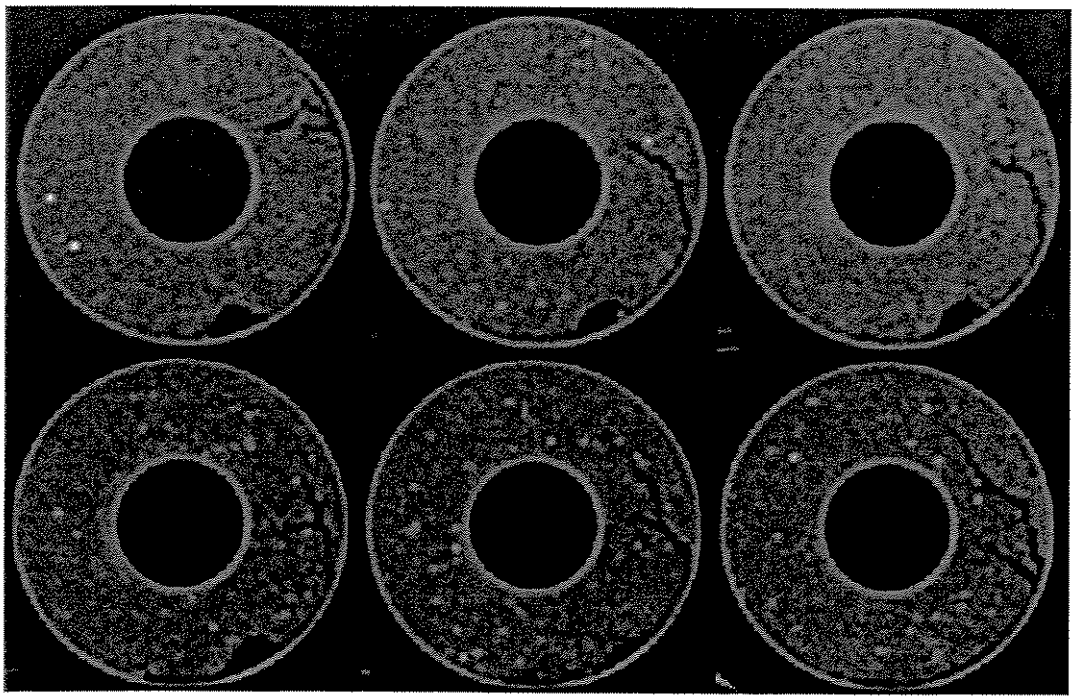


Figura 6.3 - Seqüência de imagens de um filtro de carbono ativado mostrando uma série de defeitos

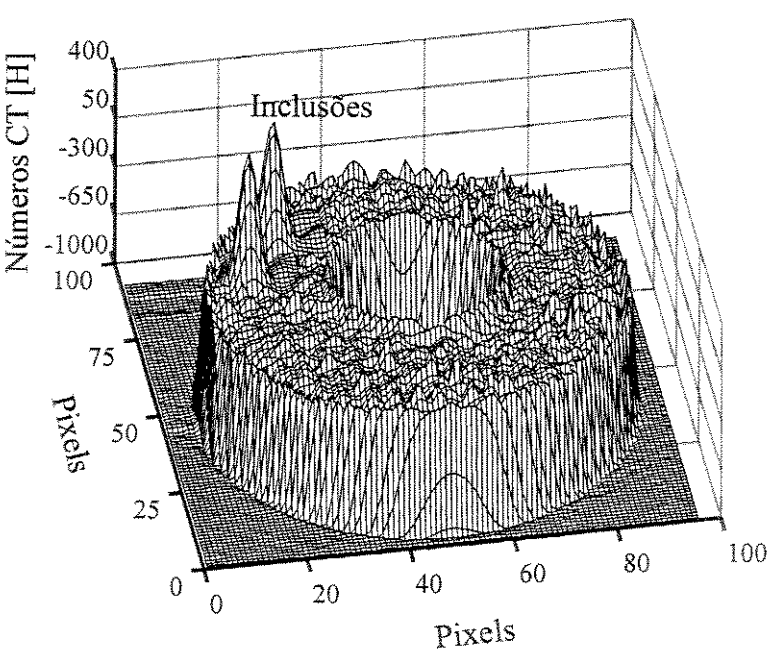



Figura 6.4 - Reconstrução gráfica da primeira imagem da seqüência da Figura 6.3

### *6.1.3 Defeitos em filtros do tipo resinado*

Na Figura 6.5 apresenta-se uma seqüência de fatias tomográficas correspondentes a um filtro do tipo resinado, construído com fibras curtas aglomeradas por meio de uma resina. Em todas as imagens é possível visualizar regiões de alta densidade, ou seja, defeitos caracterizados por um acúmulo de resina e/ou fibras naquelas regiões. Estas regiões podem ser vistas graficamente na Figura 6.6, na qual aparece o perfil de intensidade (ou números CT) dos *pixels* localizados entre os pontos 1 e 2, na Figura 6.5. Os picos vistos na Figura 6.6 mostram os altos valores de atenuação correspondentes às regiões de defeitos.

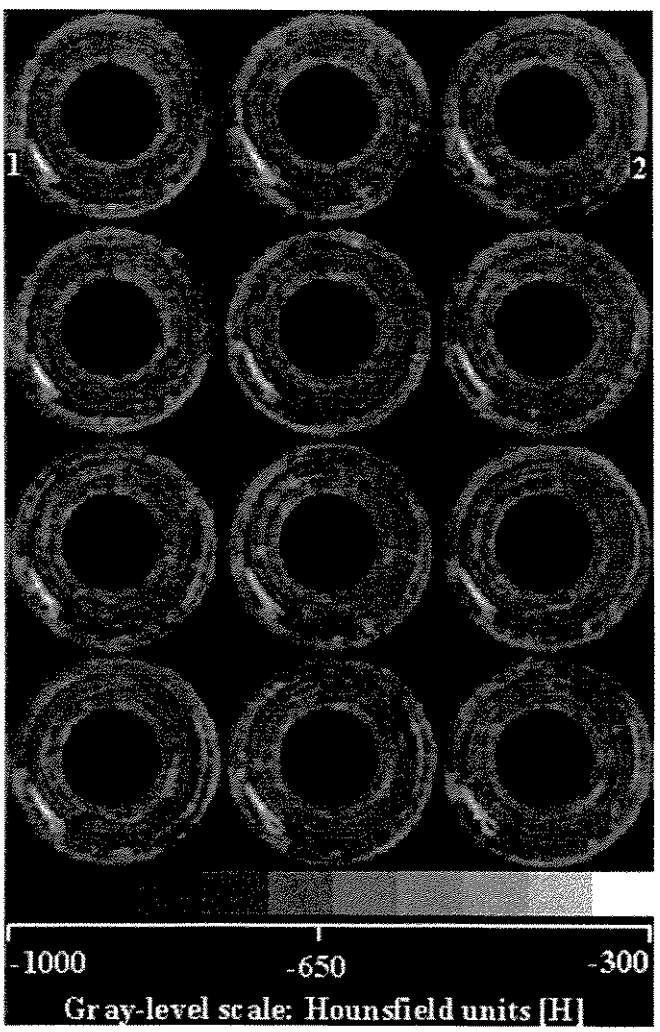



Figura 6.5 - Seqüência de imagens de um filtro resinado mostrando regiões de alta densidade

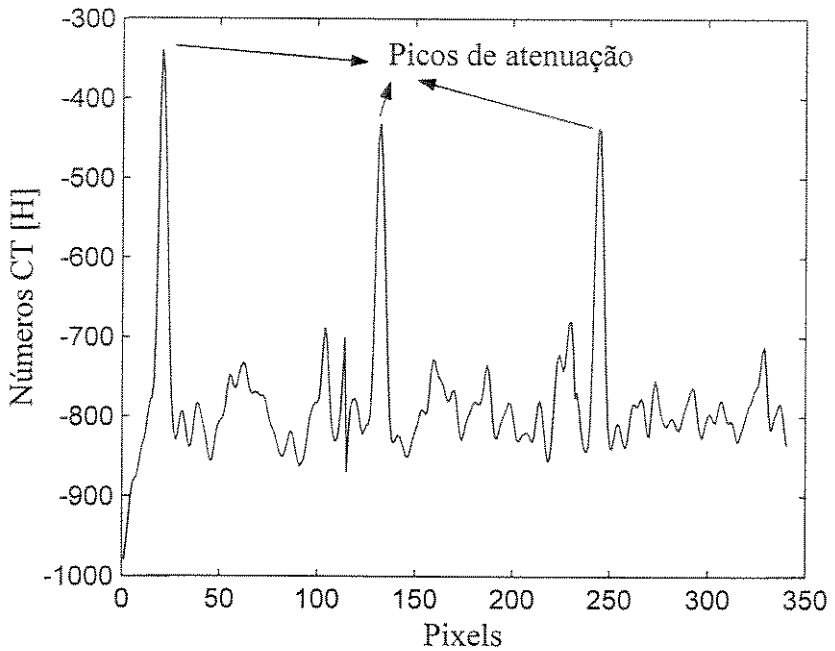



Figura 6.6 - Picos de atenuação em imagens de um filtro resinado: defeitos em forma de aglomerados de fibras e resina

Esta análise preliminar mostra que a tomografia de Raios-X pode ser usada com sucesso na indústria de filtros, podendo ser aplicada na análise de diversos tipos de elementos filtrantes. Vários defeitos podem ser detectados, tais como fraturas ou trincas em filtros do tipo carbono ativado, por exemplo, regiões que caracterizem instabilidade do processo na fabricação de elementos do tipo resinado, etc. A vantagem da técnica é que os defeitos podem ser caracterizados localmente, o que possibilita o mapeamento do desvio do processo que levou a estes defeitos.

Diferentemente da indústria de construção mecânica, que utiliza materiais metálicos de alta densidade, basicamente o aço, a indústria de filtração configura-se como um campo altamente favorável à aplicação da técnica de tomografia computadorizada de Raios-X, usando-se equipamentos semelhantes àqueles usados na área médica. Uma das razões para isso é que a grande parte dos produtos é construída a partir de materiais de relativa baixa densidade, tais como as fibras poliméricas, não necessitando de fontes de alta potência. Desta forma, tomógrafos equipados com fontes de baixa potência, inclusive equipamentos recondicionados, podem ser usados pela indústria de filtros. Fontes de baixa potência implicam em equipamentos com menor custo de aquisição e manutenção. No caso da indústria metal-mecânica, poucas são as que

possuem equipamentos de tomografia. Dos poucos casos, pode-se citar a Boeing, a qual possui tomógrafos de altíssima potência, conseguindo tomografar turbinas de grande porte. Porém, são equipamentos que envolvem custos muito elevados.

## 6.2 Fator de forma

A realização dos testes de contaminação dos filtros permitiu, também, a obtenção de medidas da queda de pressão *versus* vazão, para o filtro virgem. O objetivo foi avaliar o fator de forma intrínseco aos elementos filtrantes.

Na Figura 6.7 está apresentada a curva da queda de pressão, em função da vazão, para os dois tipos de filtros testados neste trabalho. Primeiramente, observa-se um comportamento linear das curvas, mostrando que a queda de pressão nos elementos é diretamente proporcional à vazão. Observa-se, também, que a queda de pressão relativa ao filtro resinado é mais acentuada, ou seja, a disposição e o tipo de fibras (fibras curtas) neste filtro oferece maior resistência à passagem do fluido.

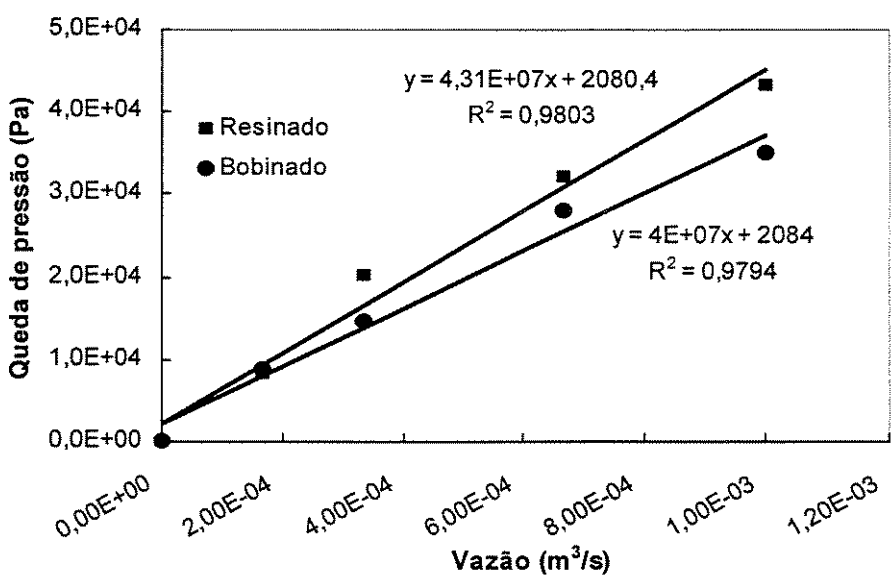



Figura 6.7 - Queda de pressão em função da vazão para os tipos de filtros analisados

Observa-se também, na Figura 6.7, as curvas de ajuste linear relativas aos dados experimentais. OHZAWA *et al.* (1998) sugerem que um filtro constituído por fibras apresenta uma queda de pressão de acordo com a seguinte equação:

$$\Delta P = \frac{16F.\mu.e_F.(1-\overline{\phi})^2}{\overline{\phi}^3.\overline{D}_F^2}u \qquad (6.1)$$

sendo u a velocidade de filtração, F, $e_F$ e $\overline{\phi}$ o fator de forma intrínseco, a espessura e a porosidade média do filtro, respectivamente, e $\overline{D}_F$ o diâmetro médio das fibras. Substituindo a velocidade de filtração por Q/A, sendo Q a vazão e A a área da seção transversal da tubulação, tem-se:

$$\Delta P = \frac{16F.\mu.e_F.(1-\overline{\phi})^2}{\overline{\phi}^3.D_F^2.A}Q \qquad (6.2)$$

Adotando-se as equações de ajuste da Figura 6.7 e igualando-se os coeficientes angulares com o coeficiente angular da Equação 6.2 com os parâmetros mostrados na Tabela 6.1, chega-se a:

$F_{resinado} = 1{,}007$

$F_{bobinado} = 0{,}935$

Tabela 6.1 - Parâmetros para o cálculo do fator de forma

| Parâmetro | $\mu$ (Pa.s) | $e_F$ (m) | $\overline{\phi}$ | $\overline{D}_F$ (m) | A ($m^2$) |
|---|---|---|---|---|---|
| Valor | $1{,}3\times10^{-3}$ | $18{,}8\times10^{-3}$ | 0,80 | $50\times10^{-6}$ | $2{,}85\times10^{-4}$ |

Pode-se observar que o fator de forma relativo aos dois tipos de filtro são bem próximos, sendo 1,007 para o filtro resinado e 0,935 para o filtro bobinado. Vale ressaltar, portanto, que para as vazões utilizadas neste trabalho, o fator de forma devido à constituição dos filtros praticamente não exerceu influência. Observa-se, também, que a relação linear entre a queda de pressão e a vazão valida o uso da equação de Darcy no modelo de filtração.

## 6.3 Resultados experimentais

Nesta seção mostram-se alguns casos objetivando analisar o comportamento de alguns filtros com relação à retenção gradual de partículas, ou seja, para elementos com a mesma especificação, varia-se o tamanho das partículas para se verificar a profundidade atingida nos elementos. A estratégia de análise é inicialmente desenvolvida com base no modelamento gráfico tridimensional das seqüências de imagens relativa a cada elemento (ou amostra).

### *6.3.1 Influência do tamanho de partícula*

Os gráficos tridimensionais relativos às amostras 1, 2 e 3 estão apresentados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10, respectivamente. A posição 0, no eixo da seqüência de máscaras, refere-se à superfície interna, enquanto que a posição 36 refere-se à superfície externa do filtro. O gráfico relativo à amostra 1 mostra que as partículas se concentraram preferencialmente na região central (em relação à posição radial - espessura- do filtro), entre as posições 12 e 30 do eixo no qual aparece a seqüência de máscaras. Apesar de as partículas encontrarem-se numa faixa de tamanho (37 μm a 44 μm) abaixo da especificação do filtro (50 μm), observa-se (pelo gráfico da Figura 6.8) que apenas uma pequena quantidade atingiu as camadas mais internas do filtro. Pode-se ver que entre as posições 0 e 12, há apenas alguns indícios da presença de partículas. Nas camadas mais externas (posições acima de 30) também se verifica pouca presença de partículas.

O gráfico relativo à amostra 2 (Figura 6.9) mostra uma maior tendência das partículas se concentrarem em posições mais internas do filtro, apesar de as partículas serem maiores do que no caso da amostra 1. Maior concentração de partículas pode ser vista entre as posições 3 e 20, aproximadamente. Uma pequena parte das partículas concentrou-se nas regiões mais externas.

Considerando puramente a relação de tamanhos entre as partículas e o filtro (capacidade de retenção, em μm) era de se esperar que no caso da amostra 1, as partículas atingissem posições mais internas, quando se compara com o caso da amostra 2. Este comportamento pode estar relacionado com a influência de outros mecanismos de filtração, além da exclusão por tamanhos, e, principalmente, com as diferenças microestruturais entre as amostras (mesmo tendo a mesma

especificação comercial). Desta forma, a região intermediária da amostra 1 provavelmente é constituída por poros menores em relação à região de mesma posição, na amostra 2. Sendo constituída por poros maiores (em relação à amostra 1), a região intermediária da amostra 2, deixaria passar com mais facilidade as partículas maiores (45 a 53 μm), notando-se, assim, uma maior concentração em torno das posições 12 a 18 (Figura 6.9).

A Figura 6.10 mostra uma distribuição mais homogênea, quando comparada com os casos das amostras 1 e 2. Porém, apesar de ter sido contaminado com partículas entre 62 e 74 μm de diâmetro, ou seja, maior do que os 50 μm que expressam a capacidade de retenção do elemento, a concentração atingiu níveis inferiores aos níveis relativos às amostras 1 e 2. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato de que, as partículas sendo maiores, têm uma maior probabilidade de se chocar com a parede do filtro e não penetrar, ou seja, há uma maior tendência de ocorrer um processo secundário de sedimentação dessas partículas, o que faz com que o filtro tenha uma menor eficiência global.

A análise feita acima mostra que, para este filtro, não há uma concordância entre a capacidade de retenção do elemento e a retenção efetivamente observada experimentalmente. Partículas com tamanho abaixo da capacidade de retenção não se concentraram preferencialmente nas regiões mais internas. Os gráficos mostrados nas Figuras 6.8, 6.9 e 6.10 revelam, ainda, que a concentração de contaminantes na direção do comprimento do filtro (eixo onde aparecem os cortes tomográficos) apresenta um comportamento cíclico, ou seja, entre um corte tomográfico e outro há uma relativa variabilidade na concentração de contaminantes.

A variabilidade na concentração ao longo do comprimento dos filtros está mais relacionada com a própria estrutura do elemento, ou seja, o bobinamento em espiral promove regiões alternadas, variando entre altos e baixos índices de empacotamento dos feixes de fibras. As regiões de baixo nível de empacotamento tendem a formar maiores espaços e estes, por sua vez, tendem a permitir com maior facilidade a formação de aglomerados. Esta razão é predominante sobre o efeito do escoamento, pois este é relativamente uniforme na direção do comprimento, alterando em menor intensidade a concentração local de partículas.

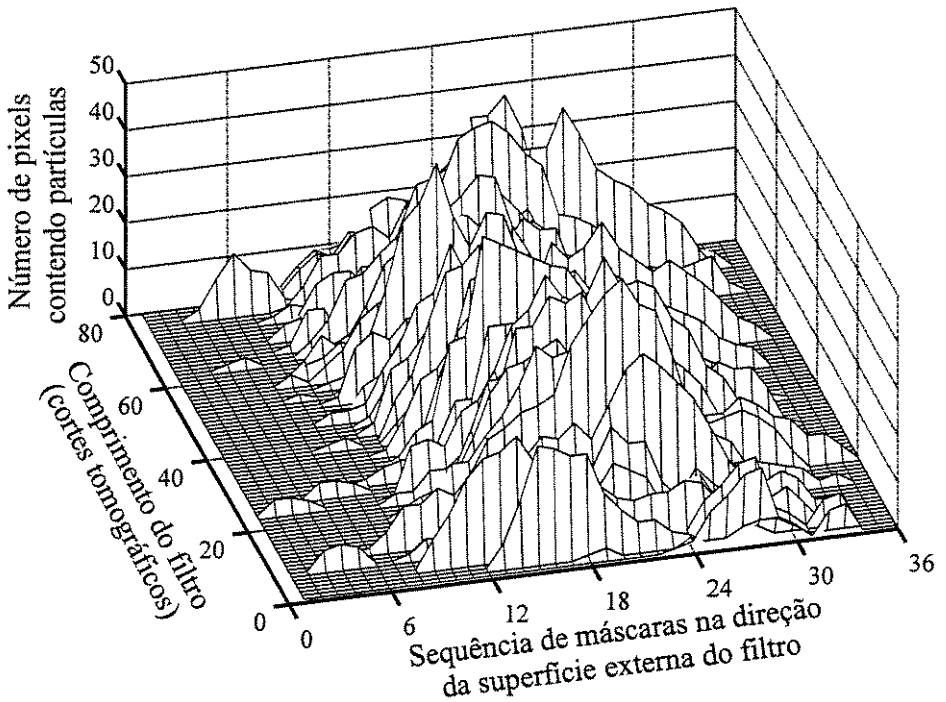



Figura 6.8 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 1
(Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 37 μm a 44 μm)

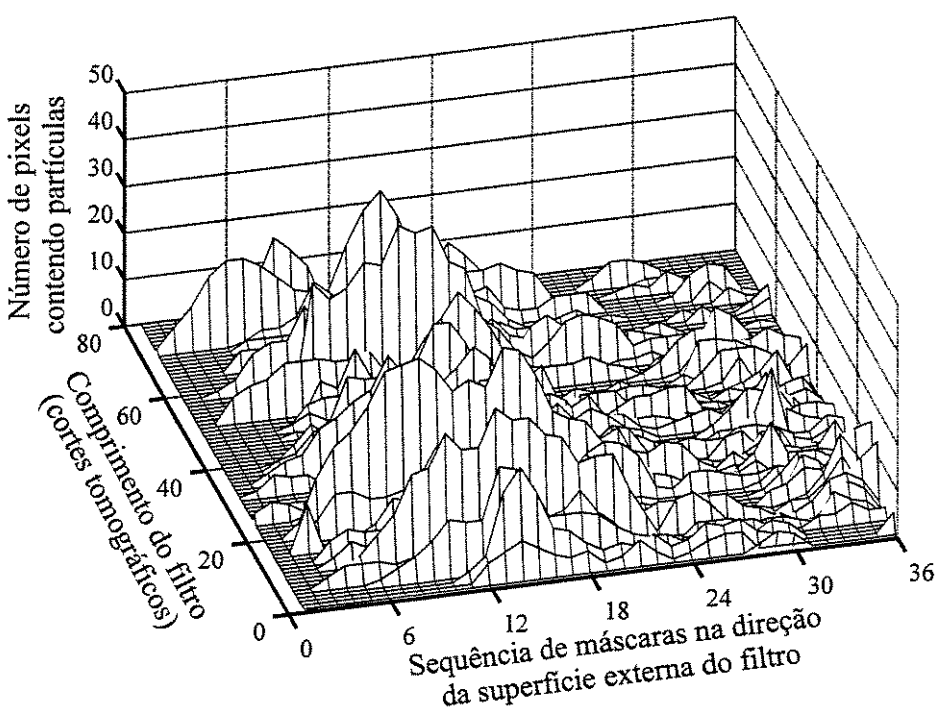



Figura 6.9 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 2
(Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 45 μm a 53 μm)

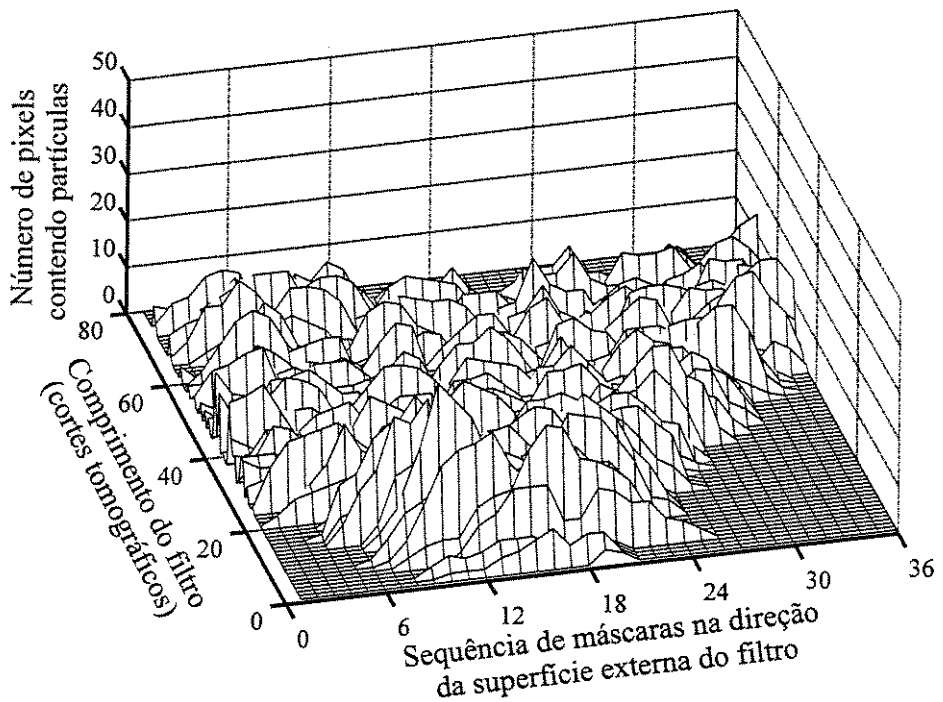



Figura 6.10 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 3
(Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 62 μm a 74 μm)

A reconstrução tridimensional das imagens permite analisar a característica dos aglomerados formados pelas partículas em cada situação ensaiada experimentalmente. Nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13 apresenta-se a reconstrução em três diferentes regiões relativas às amostras 1, 2 e 3, respectivamente. Nestas Figuras, os tons em amarelo revelam a presença de partículas, ou aglomerados de partículas. Pode-se notar, ainda, elipses posicionadas nas extremidades das imagens, cujo objetivo é a melhor delimitação das regiões reconstruídas.

A extração das três regiões tem como objetivo modelar o nível de profundidade atingido pelas partículas. O objetivo destas reconstruções é, ainda, mostrar a distribuição espacial na direção angular do sistema de coordenadas cilíndricas. Os gráficos 3D mostram a concentração em função da posição radial e do comprimento dos filtros.

A constatação feita através dos gráficos das Figuras 6.8 e 6.9 são também verificadas por meio das imagens mostradas nas Figuras 6.11 e 6.12. Na Figura 6.11-b nota-se a predominância de acúmulo de aglomerados na região intermediária do filtro. Uma menor quantidade é verificada na parte externa (6.11-a) e, uma quantidade menor ainda, é verificada na região interna (6.11-c). Porém, a Figura 6.13-a mostra um confinamento bastante acentuado das partículas.

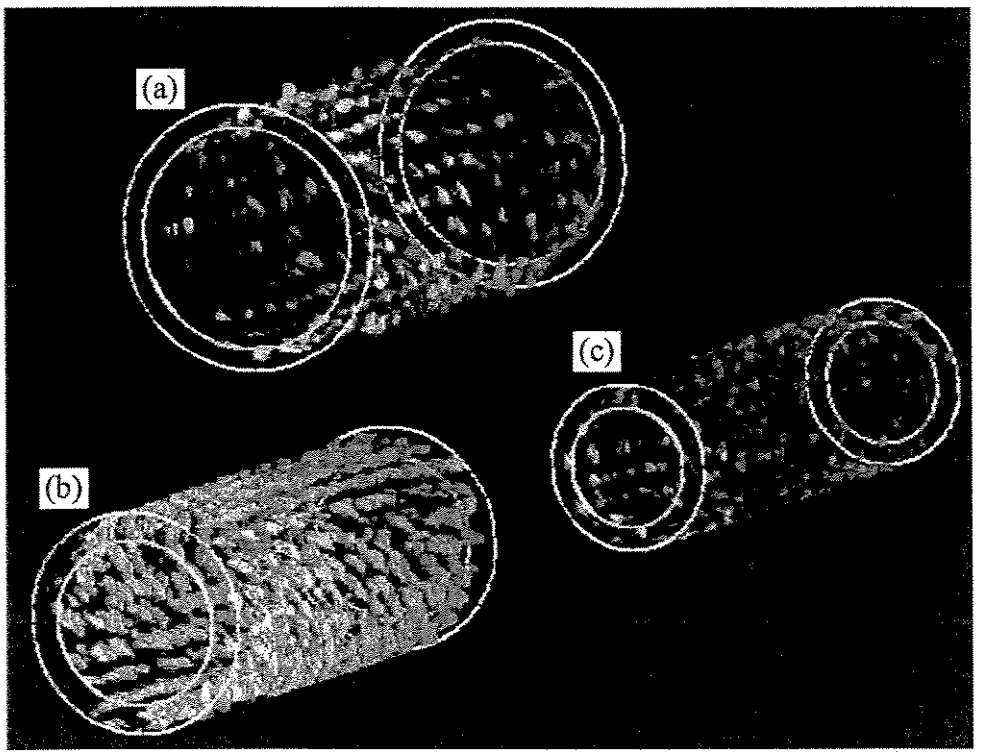



Figura 6.11 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 1 (Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 37 μm a 44 μm)

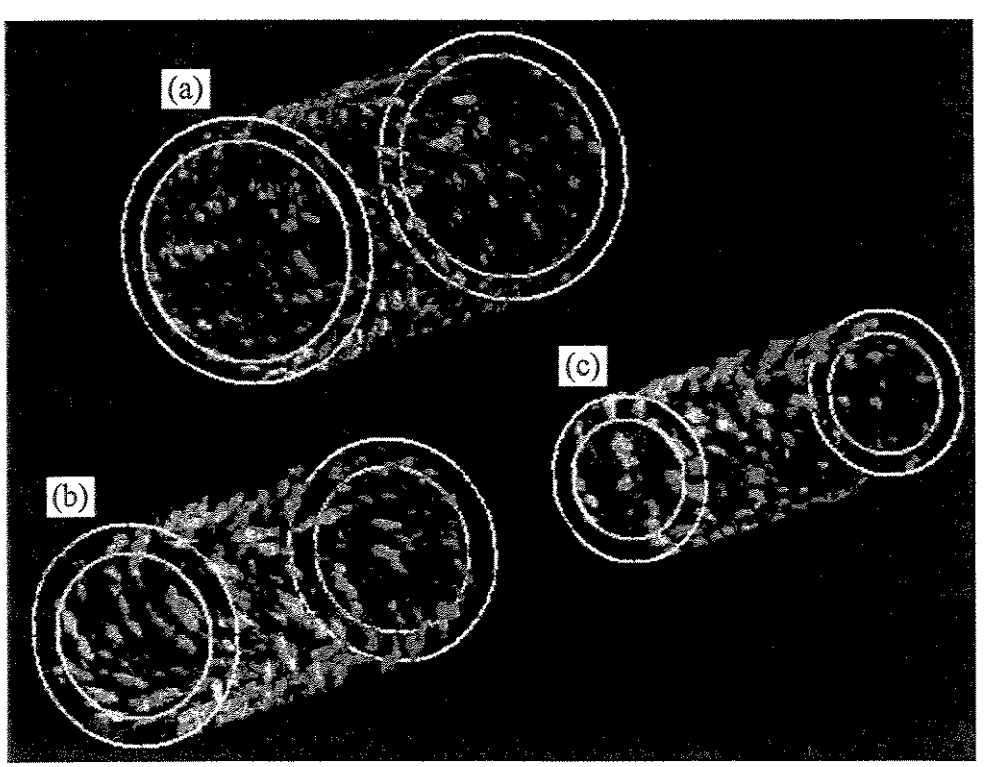



Figura 6.12 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 2 (Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 45 μm a 53 μm)

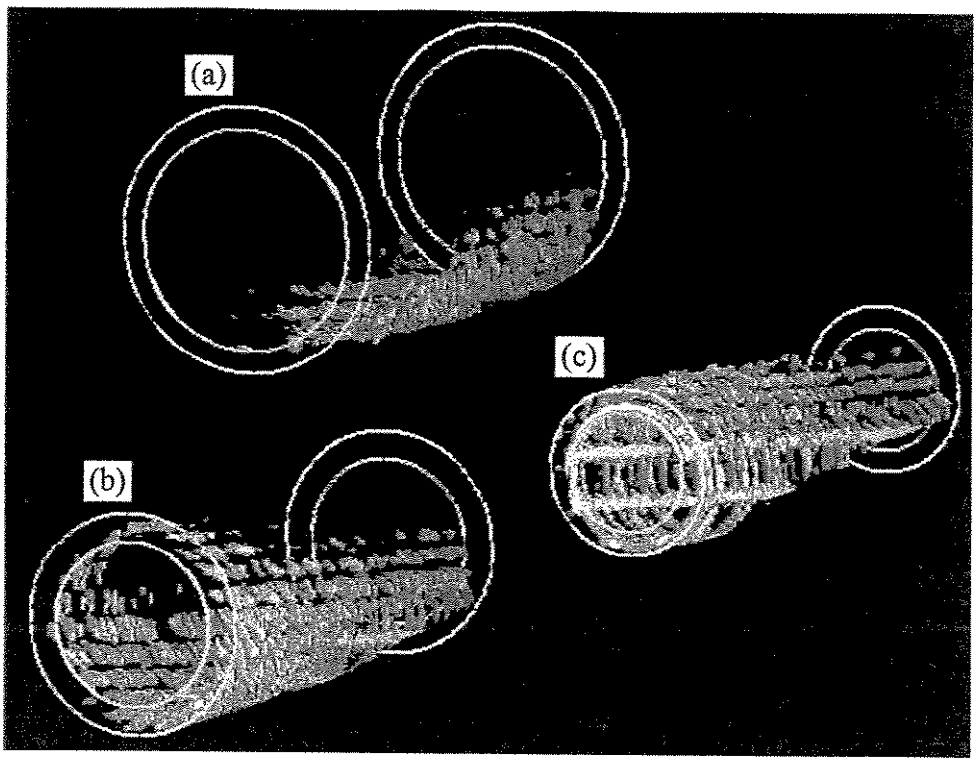



Figura 6.13 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 3 (Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 62 μm a 74 μm)

Adotando-se as mesmas condições usadas nas amostras 1, 2 e 3; foi analisado um outro tipo de filtro (tipo resinado), a fim de se verificar o comportamento com relação à retenção de partículas. Nas Figuras 6.14, 6.15 e 6.16 mostra-se a concentração de contaminantes relativa à amostra 4, 5 e 6, respectivamente, ou seja, elementos do tipo resinado, de 50 μm, contaminados com partículas com diâmetro entre 37 μm e 44 μm, 45 μm e 53 μm e 62 μm e 74 μm.

Primeiramente, pode-se verificar que o comportamento deste tipo de filtro difere consideravelmente daquele caracterizado pelas amostras 1, 2 e 3. A tendência é o acúmulo preferencial de contaminantes nas partes mais externas do filtro. Somente na amostra 4 é que se verifica uma maior tendência de concentração em camadas mais centrais e internas. Para os casos das amostras 5 e 6 (Figuras 6.15 e 6.16, respectivamente), fica mais claro que o acúmulo de partículas ocorre nas camadas mais externas do filtro. Especificamente no caso da amostra 6, fica bem evidente que praticamente todo o acúmulo ocorre entre as camadas delimitadas pelas máscaras 24 e 36. Isto mostra que apenas 33 % da espessura do filtro atuaram eficientemente na captura de partículas.

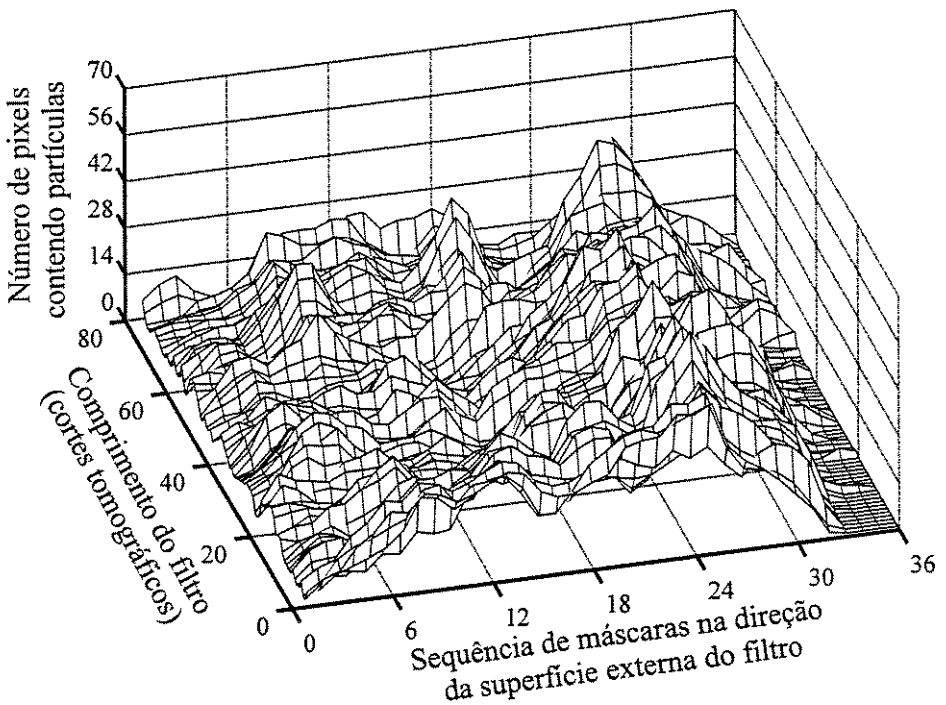



Figura 6.14 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 4
(Filtro resinado de 50 μm contaminado com partículas de 37 μm a 44 μm)

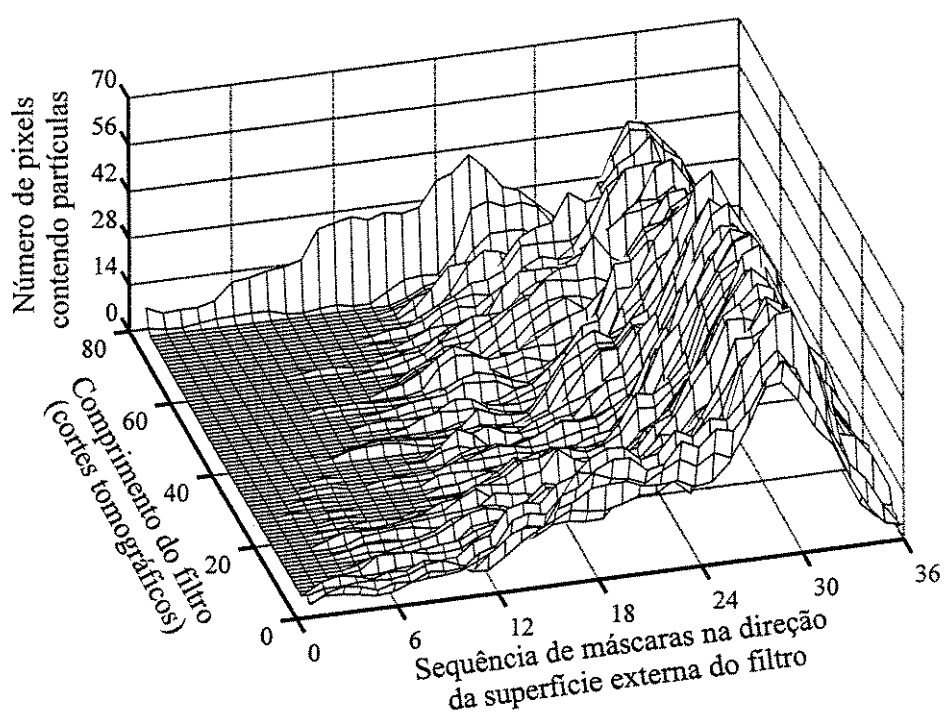



Figura 6.15 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 5
(Filtro resinado de 50 μm contaminado com partículas de 45 μm a 53 μm)

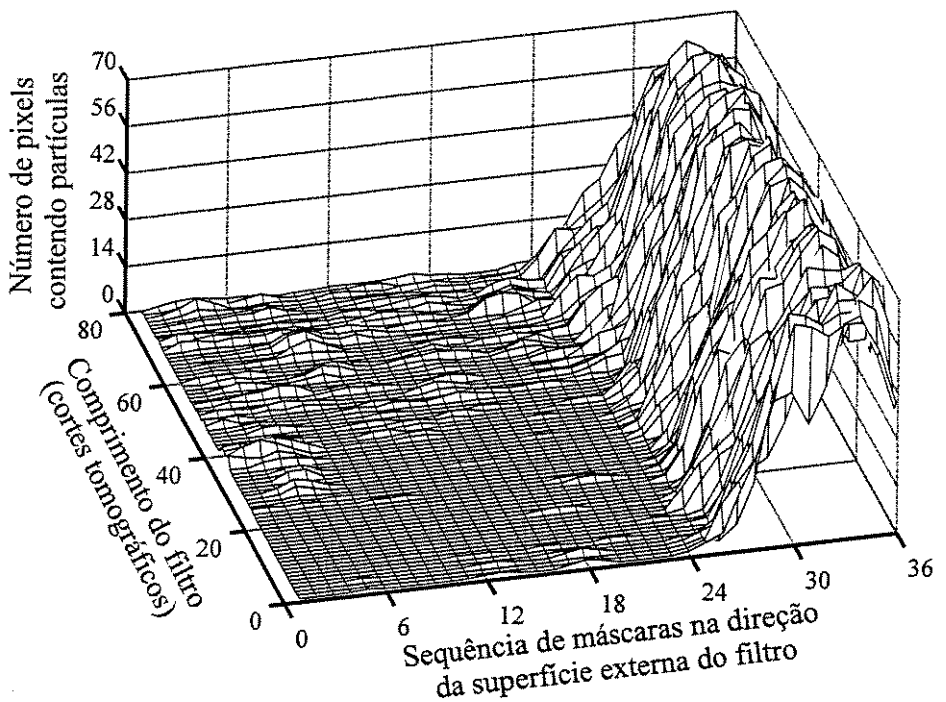



Figura 6.16 - Modelamento gráfico da distribuição de partículas na amostra 6 (Filtro resinado de 50 μm contaminado com partículas de 62 μm a 74 μm)

O tipo de retenção característico do filtro representado pelas amostras 4, 5 e 6 pode ser visto pelas reconstruções tridimensionais apresentadas nas Figuras 6.17, 6.18 e 6.19, respectivamente. Estas Figuras mostram qualitativamente o que se nota por meio da análise quantitativa, ou seja, os gráficos 3D mostrados anteriormente. Permitem, também, a constatação de que nestes filtros há uma forte tendência de formação da torta de filtração, diferentemente do que se constata por meio das reconstruções mostradas nas Figuras 6.11, 6.12 e 6.13. Naquelas, pode-se notar que a acomodação das partículas ocorre predominantemente em formas de aglomerados.

Convém analisar, ainda, a estrutura formada pelo sólido (torta) nas amostras 4, 5 e 6. Nestes casos, pode-se notar uma certa concordância entre o posicionamento das partículas, ou seja, a profundidade atingida no filtro, e o seu tamanho. Na amostra 4, na qual foram usadas partículas com diâmetros variando entre 37 μm e 44 μm no processo de saturação, a torta se distribui mais homogeneamente no interior do filtro, quando se compara com as amostras 5 e 6. Na amostra 5, na qual foram usadas partículas com diâmetros variando entre 45 μm e 53 μm, já se nota que a torta pouco atinge as regiões mais internas (Figura 6.18-c). A formação da torta preferencialmente na borda externa do filtro se evidencia na amostra 6 (Figura 6.19-a).

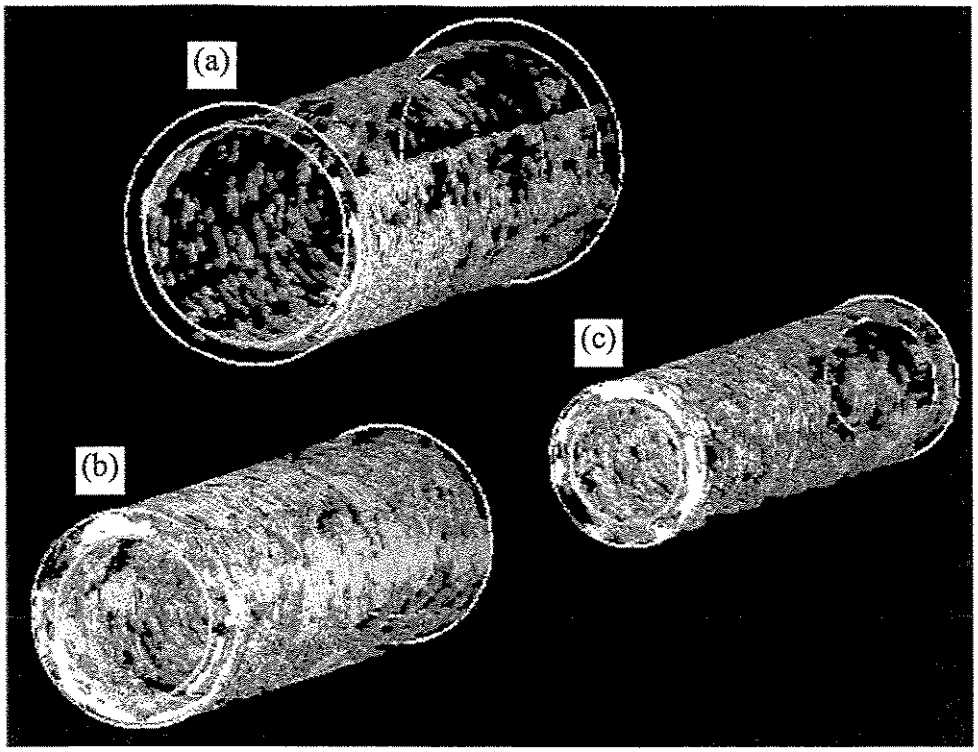



Figura 6.17 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 4

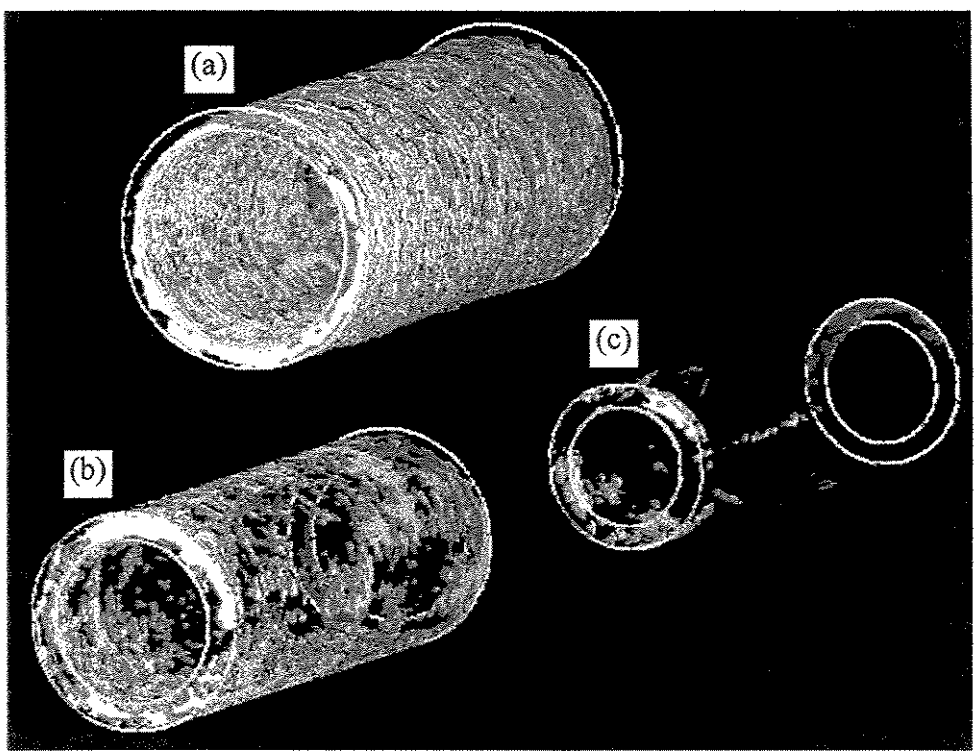



Figura 6.18 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 5

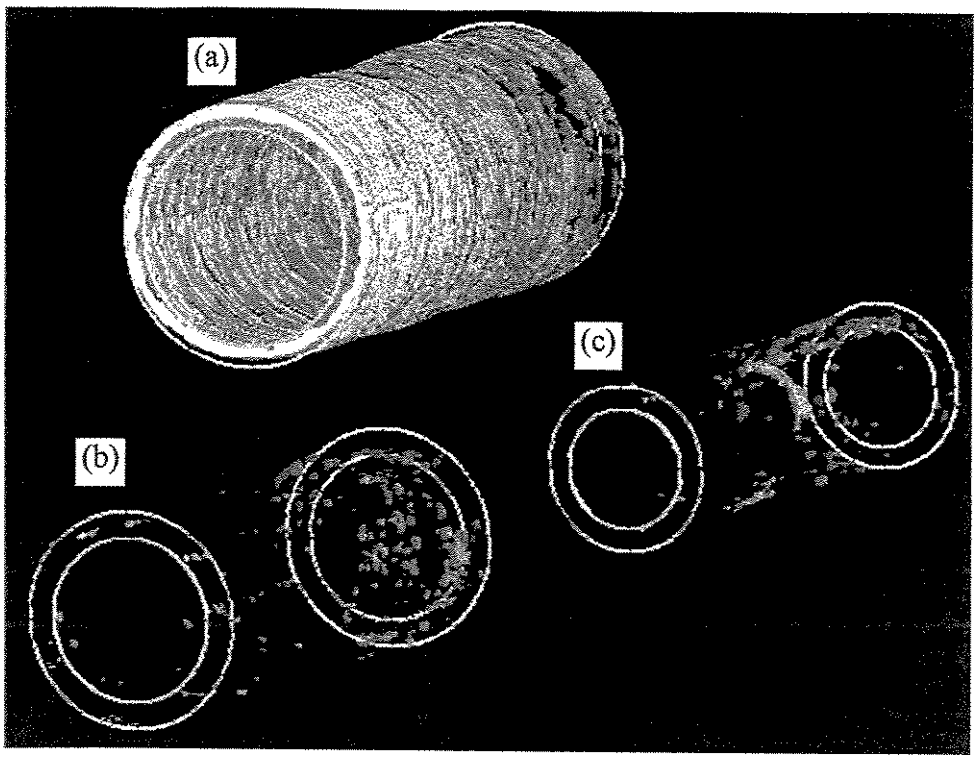



Figura 6.19 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 6

Na Figura 6.20 apresenta-se o perfil de concentração global, em função da posição radial (normalizada em relação à espessura), relativo à amostra 2. A curva representada pelos símbolos (Δ) foi obtida totalizando-se a concentração de partículas nas máscaras de mesma posição ao longo do comprimento, de forma a se obter a concentração (normalizada em relação à concentração máxima) em função da espessura do filtro. Da mesma forma, na Figura 6.21, apresenta-se o perfil de concentração global relativo à amostra 5. Ambas as amostras foram contaminadas com partículas de diâmetro entre 45 μm e 53 μm. Nas duas Figuras pode-se ver, também, as curvas de ajuste (linhas cheias) dos dados experimentais (dados tomográficos). O ajuste polinomial, nos dois casos, apresenta um coeficiente de correlação ($R_{cor}$) bem próximo de 1 (0,989 relativo à amostra 2 e 0,961 relativo à amostra 5), o que significa uma representação coerente com os dados obtidos experimentalmente. Vale lembrar que as curvas de ajuste são definidas dentro do intervalo $\{\forall r, 0 \leq r \leq r_e\}$, sendo r uma posição radial qualquer e $r_e$ o raio externo do filtro.

Pode-se verificar, também, que os comportamentos das curvas, tanto as experimentais quanto as curvas de ajuste, são bem distintos, ou seja, na amostra 2 ocorre um pico bem destacado, ainda que suave, nas posições mais internas do filtro. Por outro lado, na amostra 5, também ocorre um pico de concentração, porém em posições marcadamente mais externas. Isto caracteriza o tipo de comportamento destes filtros com relação à retenção de contaminantes, como também apresenta as Figuras 6.9 e 6.15. No filtro bobinado (amostra 2) as partículas têm uma maior tendência de atingir maiores profundidades, ou seja, o elemento é mais eficiente em camadas mais internas.

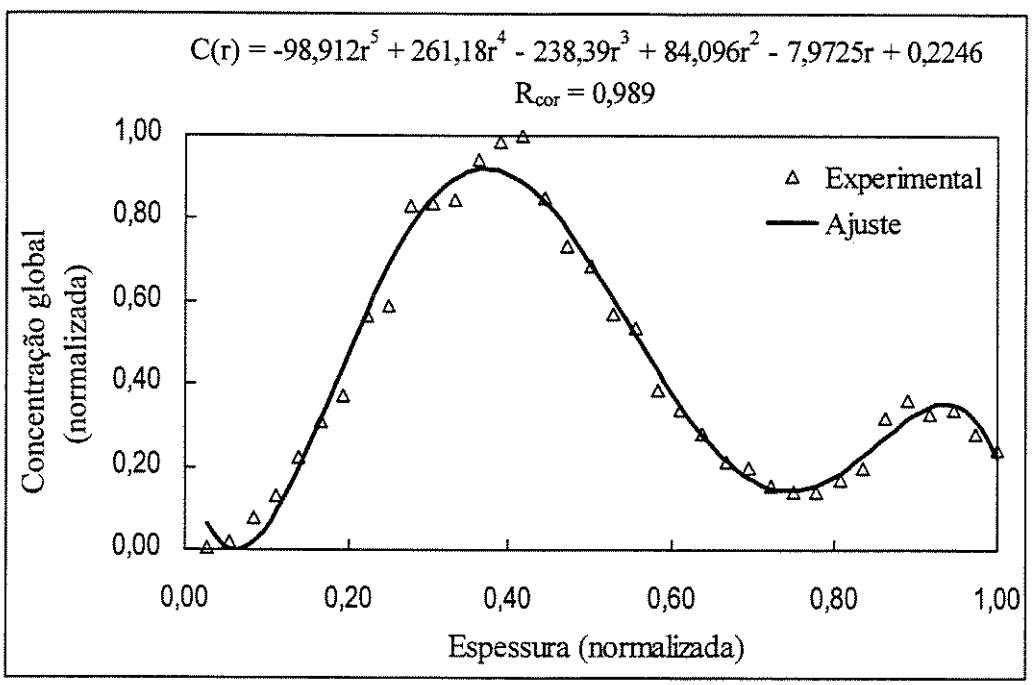



Figura 6.20 - Perfil de concentração em função da espessura da amostra 2

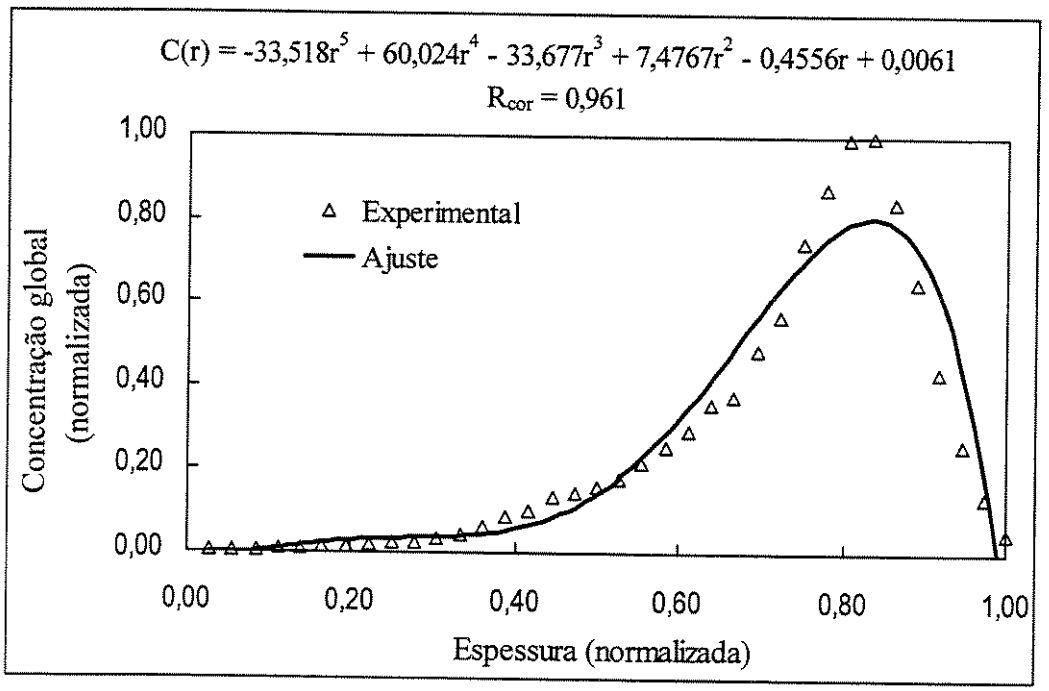



Figura 6.21 - Perfil de concentração em função da espessura da amostra 5

### *6.3.2 Influência da velocidade de filtração*

Nas Figuras 6.22, 6.23 e 6.24 são apresentadas as reconstruções tridimensionais dos aglomerados de partículas, relativas às amostras 9, 10 e 11, respectivamente. No caso da amostra 9 (vazão = 20 l/min), nota-se que a presença de contaminantes ocorre na forma de aglomerados menores e distribuídos de maneira relativamente mais homogênea. Nota-se, também, que os aglomerados estão mais esparsos. No caso da amostra 11 (vazão = 60 l/min), verifica-se que a concentração de aglomerados é predominante na região externa. Percebe-se uma baixa concentração de contaminantes nas regiões intermediária e interna. As reconstruções referentes à amostra 10 (vazão = 40 l/min) exibem uma maior quantidade de aglomerados quando comparadas às amostras 9 e 11.

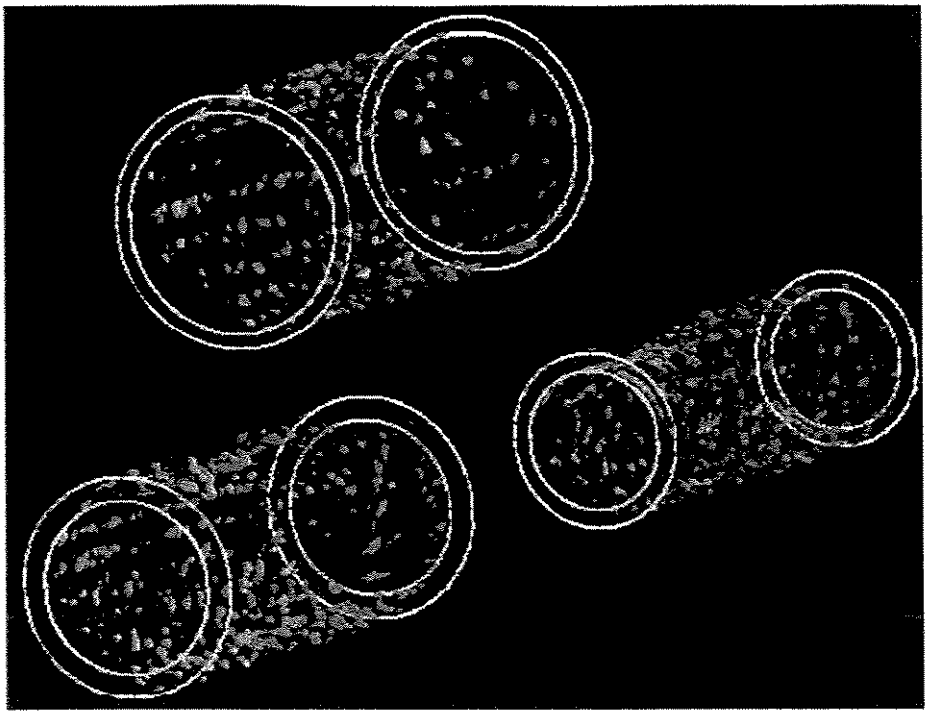


Figura 6.22 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 9
(Filtro de 30 μm contaminado com partículas de 25 μm a 32 μm, vazão do fluido: 20 l/min)

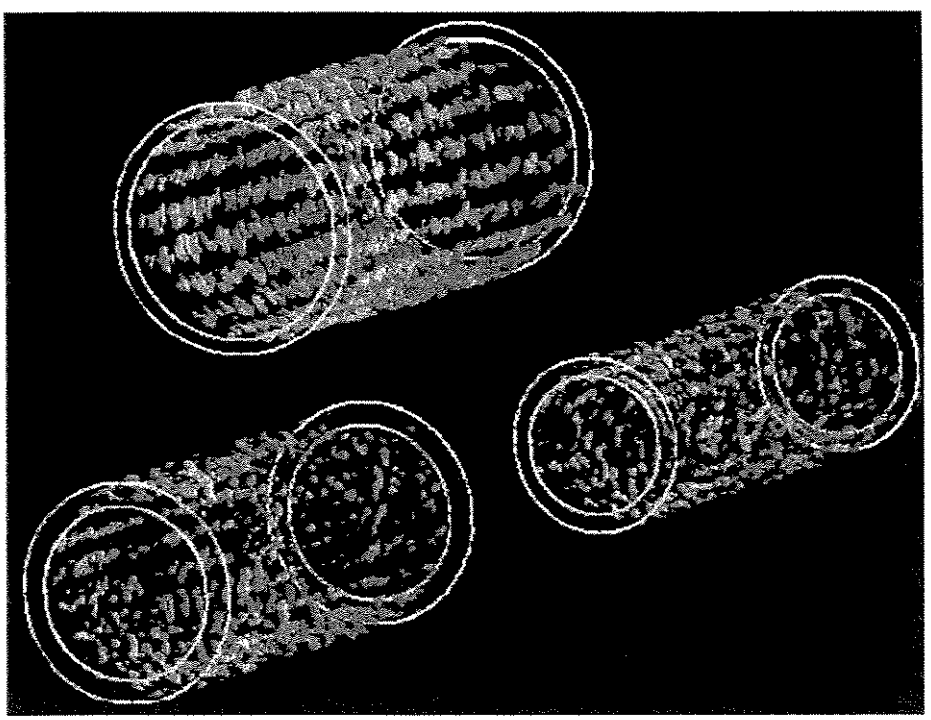


Figura 6.23 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 10
(Filtro de 30 μm contaminado com partículas de 25 μm a 32 μm, vazão do fluido: 40 l/min)

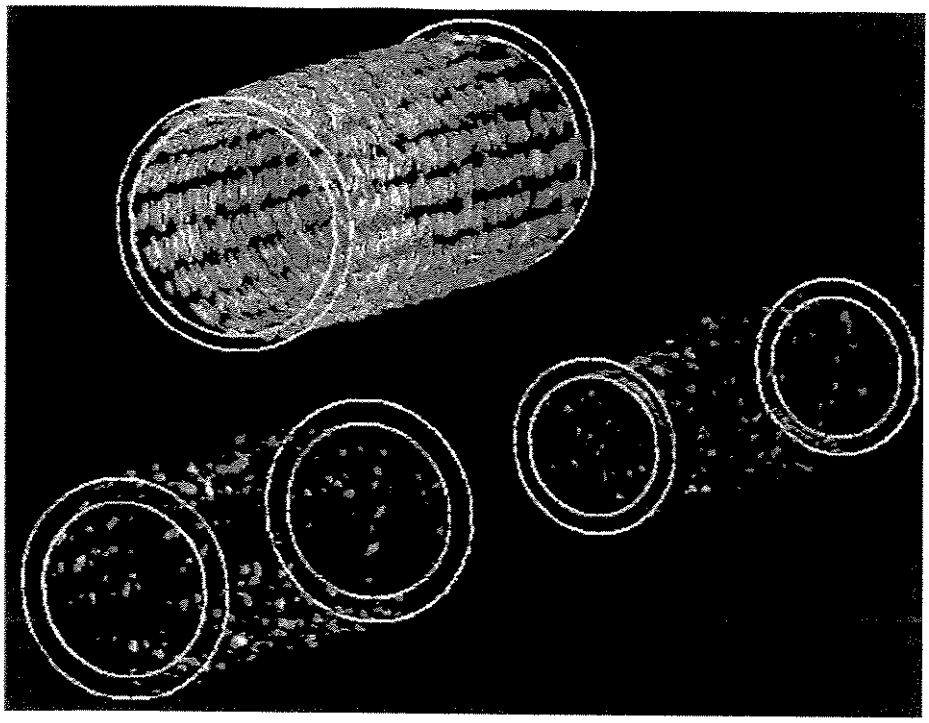


Figura 6.24 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 11 (Filtro de 30 μm contaminado com partículas de 25 μm a 32 μm, a uma vazão de 60 l/m)

Por meio da Figura 6.25 são mostrados os gráficos das concentrações referentes aos casos das amostras 9 (Figura 6.25-a), 10 (Figura 6.25-b) e 11 (Figura 6.25-c). Pode-se notar que a quantidade global de contaminantes é maior na amostra 10, seguida da amostra 11 e da amostra 9. Pode-se dizer que a amostra 10 atuou de forma mais eficiente na captura de partículas e, por outro lado, foi a que apresentou melhor utilização do espaço interno.

Compara-se, também, na Figura 6.26, o perfil de concentração global ao longo da espessura das amostras. A amostra 10 exibe o perfil mais elevado em relação às outras amostras, mostrando que processo de captura de partículas foi mais eficiente.

Nesta seção mostrou-se que a velocidade (ou vazão de filtração) exerce influência na distribuição, bem como na quantidade de contaminante retido no interior do filtro. Altas vazões tendem a provocar a formação de uma capa de contaminante na parte mais externa do filtro, onde predomina a concentração. Utilizando-se uma vazão relativamente baixa, verificou-se que a quantidade retida foi relativamente menor. Vazões intermediárias permitem a permeação de uma maior quantidade de partículas, ou seja, o espaço interno do filtro é mais bem utilizado.

O efeito descrito anteriormente pode ser comparado ao que acontece quando se joga uma determinada quantidade de areia (ou um material particulado semelhante) em uma peneira. Se o material for jogado aos poucos, ou seja, a uma taxa pequena, há uma maior tendência das partículas passarem pela peneira. Se o material for jogado a uma alta taxa, haverá maior tendência das partículas se acumularem na peneira.

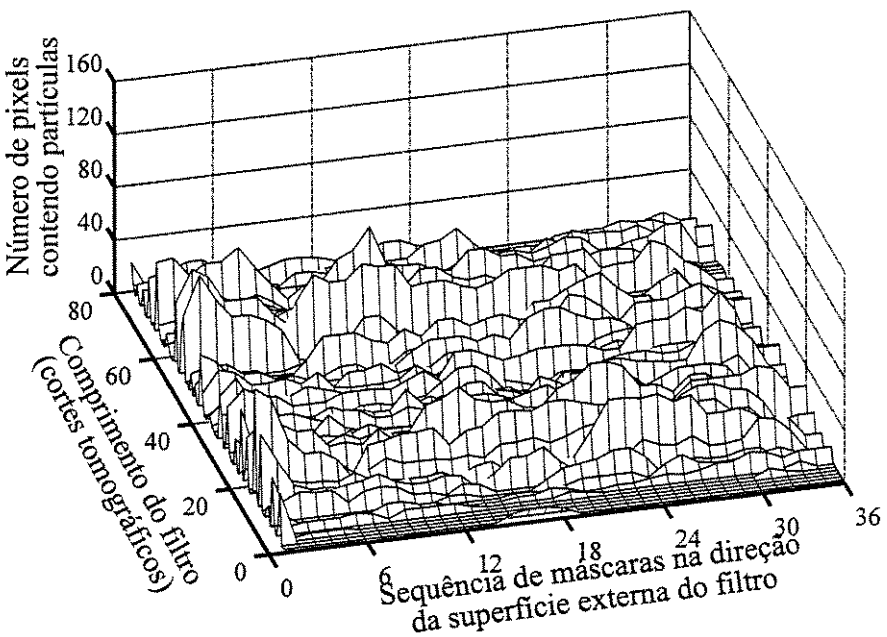



Figura 6.24 (a)

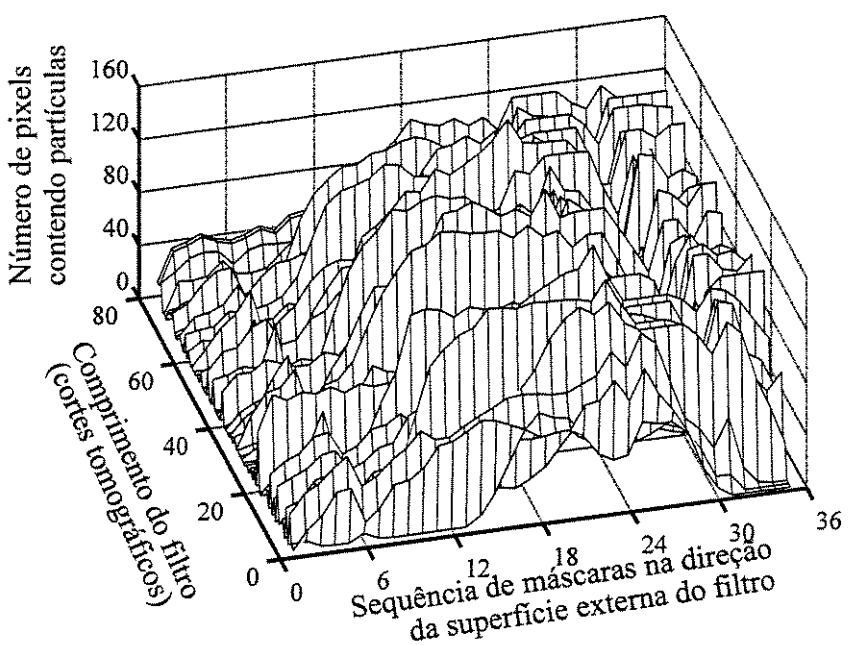
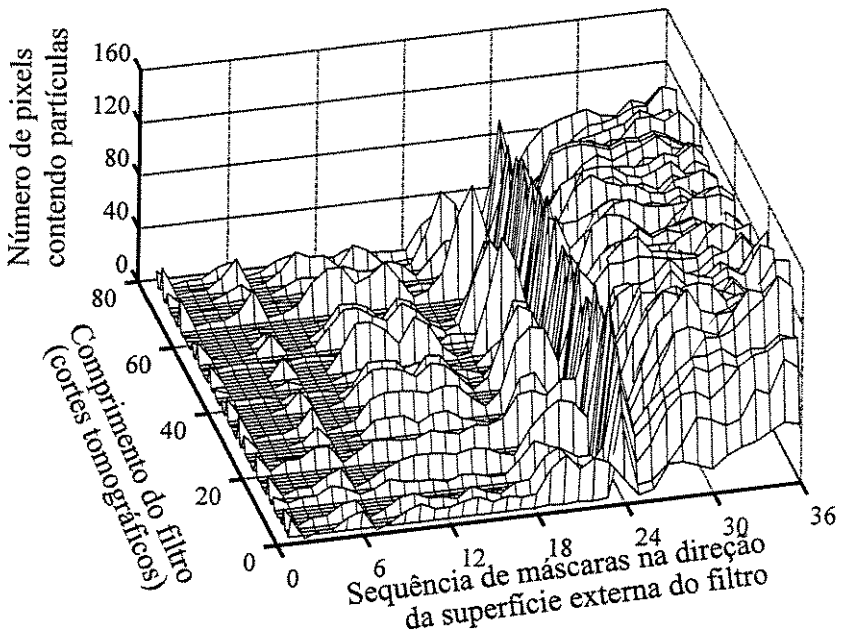



Figura 6.24 (b)




(c)

Figura 6.25 (cont.)- Modelamento da distribuição de partículas nas amostras 9 (a), 10 (b) e 11 (c)

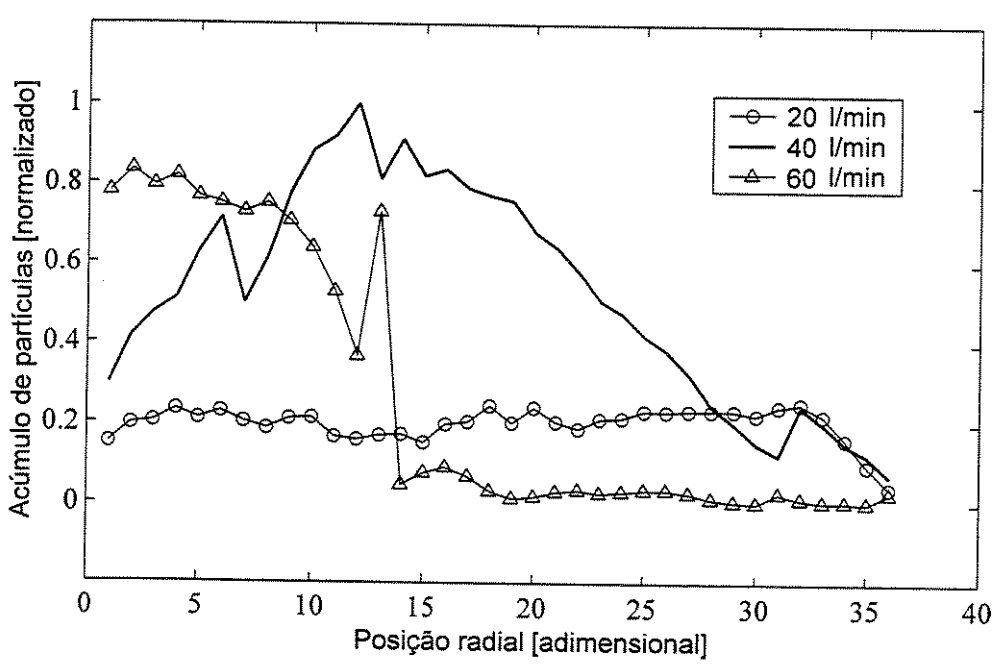



Figura 6.26 - Perfil acumulado relativo às amostras 9, 10 e 11

### *6.3.3 Influência do tipo de contaminante*

A fim de se analisar a influência do tipo de contaminante, foram realizados alguns testes com partículas de densidades diferentes. As amostras 12 e 13 foram contaminadas com partículas de densidade 2650 kg/m$^3$ e 3950 kg/m$^3$, respectivamente, de forma que as outras condições de teste (vazão, pressão, concentração do contaminante, etc), foram as mesmas para as duas amostras. Nas Figuras 6.27 e 6.28 estão apresentadas as imagens resultantes das reconstruções tridimensionais referentes às amostras 12 e 13, respectivamente. Comparando-se globalmente as duas amostras, nota-se que na amostra 13, há uma maior concentração de aglomerados, o que indica que houve a captura de uma maior quantidade de partículas.

No caso da amostra 12, há uma maior predominância de concentração de partículas nas regiões interna e intermediária. Este fato era de se esperar, pois sendo as partículas mais leves, estas apresentam maior facilidade de serem arrastadas pelo fluido, aumentando, inclusive a probabilidade da partícula escapar do filtro. Daí, a menor captura na amostra 12. No caso da amostra 13 (partículas mais pesadas), pode-se notar uma maior concentração na parte externa, quando se compara com a amostra 12, ou seja, a concentração é um pouco mais homogênea.

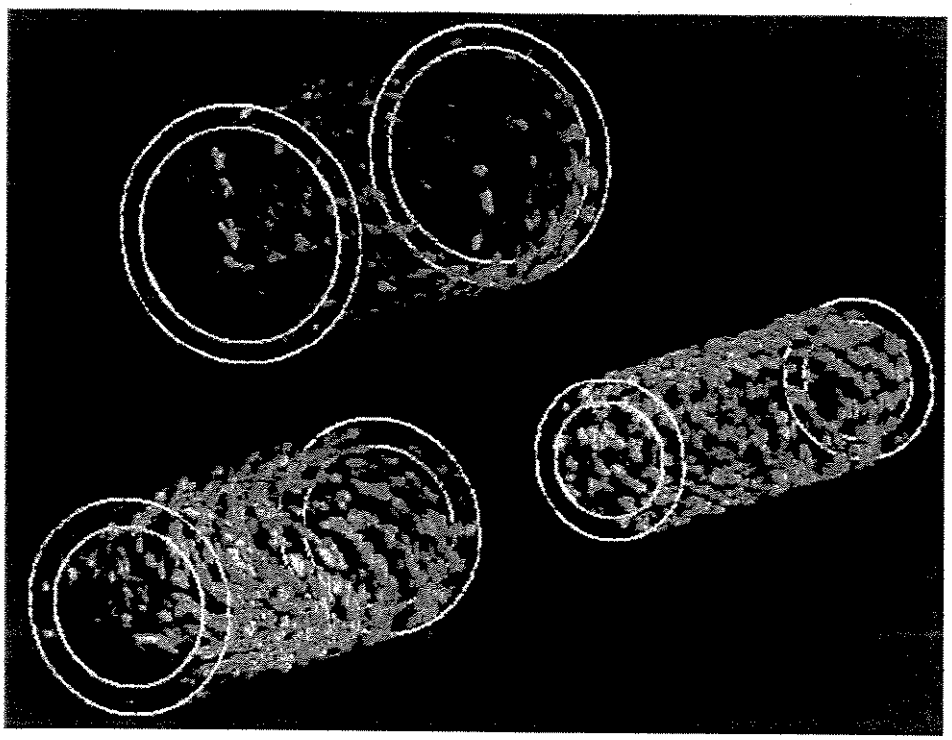


Figura 6.27 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 12 (Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 45 μm a 53 μm (2650 kg/m$^3$), a uma vazão de 20 l/m)

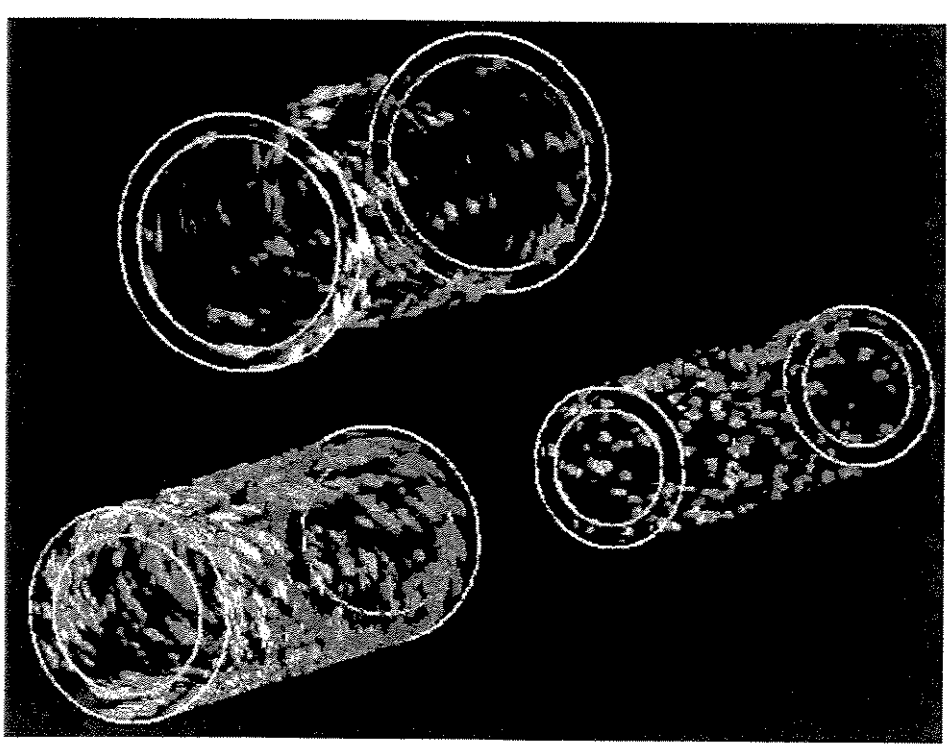


Figura 6.28 - Reconstrução tridimensional em três diferentes regiões da amostra 13 (Filtro de 50 μm contaminado com partículas de 45 μm a 53 μm (3950 kg/m$^3$), a uma vazão de 20 l/m)

## 6.4 Resultados da simulação numérica

O objetivo desta seção é a apresentação dos principais resultados obtidos da simulação numérica, aplicando-se o modelo desenvolvido, e a comparação com alguns resultados experimentais.

Com relação ao modelo numérico, as equações básicas para o cálculo dos campos de pressão e velocidade foram as de número 3.38 e 3.39 (na página 63). Naquelas equações, é possível observar que os coeficientes r1, r2, r3, r4, c1 e c2 englobam todos os termos de permeabilidade e porosidade, que são recalculados em todos os intervalos de tempo ($\Delta t$), durante as simulações. A implementação do modelo numérico foi feita pelo método implícito com direção alternada, tendo sido adaptado de GERALD AND WHEATLEY (1994).

A condição inicial para o problema foi P(t=0) = 0. Como condições de contorno, considerou-se na saída do filtro (superfície interna), P= cte = 0 e, na entrada (superfície externa), foi usada uma condição de contorno variável (do tipo *Neumann*), sendo o gradiente de pressão nessa região dado por $\mu u/K$, onde $\mu$ é a viscosidade da água, $u$ a velocidade e $K$ representa a permeabilidade da camada situada na superfície externa. O intervalo de tempo foi escolhido de acordo com as equações 3.42 e 3.43, mostradas na página 65.

Na Tabela 6.2, a seguir, são descritos os parâmetros adicionais utilizados nas simulações, para cada caso simulado. Pode-se observar que a discretização da malha (80 x 36) foi feita de acordo com a amostragem de fatias na direção do comprimento (80 imagens) e na direção da espessura do filtro (36 máscaras).

Tabela 6.2 - Parâmetros utilizados nas simulações 1 a 6

| Parâmetros | | Número da simulação | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Discretização da malha | m | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | n | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Diâmetro da fibra, DF [μm] | | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Orientação das fibras | Tipo | aleatório | | | ordenado | | |
| | θ | entre 0° e 90° | | | entre 0° e 90° | | |
| | ψ | entre 0° e 90° | | | entre 0° e 90° | | |
| Fator de empacotamento | $\alpha_{min.}$ | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| | $\alpha_{máx.}$ | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |
| Número de partículas injetadas a cada *time step* | | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Diâmetro das partículas | $D_{Pmín.}$ [μm] | 62 | 45 | 1 | 45 | 62 | 1 |
| | $D_{Pmáx.}$ [μm] | 74 | 53 | 74 | 53 | 74 | 74 |
| Tempo de simulação [s] | | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 |

Com relação ao fator α, usou-se uma função linear dependente de r (raio do filtro, representado no modelo por X), tal que o valor mínimo corresponde ao máximo de X (camada externa do filtro), e o valor máximo corresponde ao mínimo de X (camada interna do filtro). Este procedimento teve como objetivo a simulação da densidade de empacotamento gradual, a qual a maioria dos filtros possui, sendo mais densos nas regiões internas e menos nas regiões externas.

No caso da orientação das fibras nos filtros, foram utilizados dois modelos diferentes com relação ao ângulo entre as linhas de fluxo e o eixo longitudinal das fibras. Para o caso do filtro resinado, tem-se fibras curtas distribuídas aleatoriamente, de forma que os ângulos θ e ψ assumem valores aleatórios entre 0° e 90°. Entretanto, nos casos dos filtros bobinados, utilizou-se um modelo onde os ângulos θ e ψ assumem valores decrescentes a partir de 90° ate 0°, já que nestes filtros as fibras não são distribuídas aleatoriamente, apresentando uma distribuição espacial ordenada (simulações 4, 5 e 6).

Inicialmente, para a análise de sensibilidade do modelo, diferentes configurações de $\alpha$ foram testadas, utilizando-se os mesmos dados da simulação 1, e algumas funções lineares, de acordo com a Figura 6.29, na qual tem-se os seguintes casos:

simulação 1A: $\alpha(X) = -0.0010X+0.075$;

simulação 1B: $\alpha(X) = -0.0015X+0.075$;

simulação 1C: $\alpha(X) = -0.0020X+0.075$.

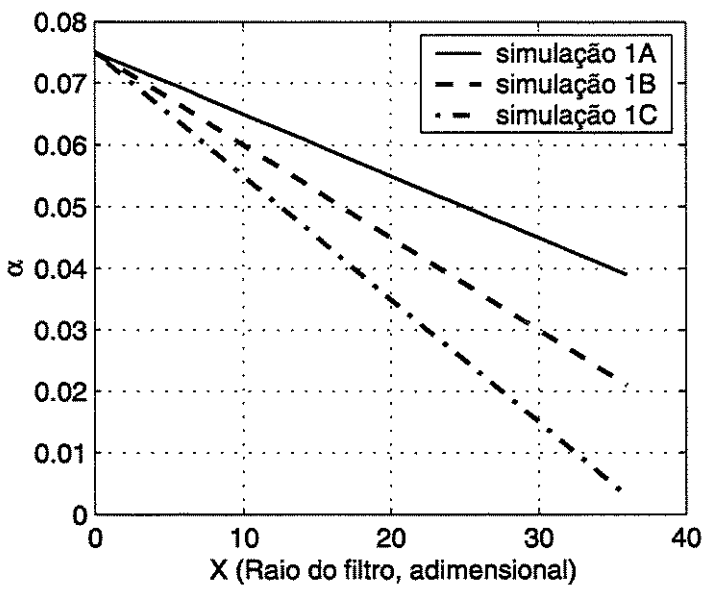



Figura 6.29 - Funções lineares para o fator de empacotamento

Na Figura 6.30 estão mostrados os gráficos da distribuição espacial de partículas para a simulação 1A (a), simulação 1B (b) e simulação 1C (c). Pode-se observar que para o caso da simulação 1A, houve uma concentração predominante em camadas mais externas (entre as posições 29 e 36 de X). Este comportamento está coerente com o fato de que neste caso o filtro simulado é mais "fechado". Observa-se que para o caso da simulação 2B, já houve concentração em camadas relativamente mais internas (abaixo de 24). O predomínio da concentração em posições relativamente mais internas acentua-se no caso da simulação 1C. Como neste caso o filtro simulado é o mais "aberto", as partículas tendem a atingir as camadas mais internas.

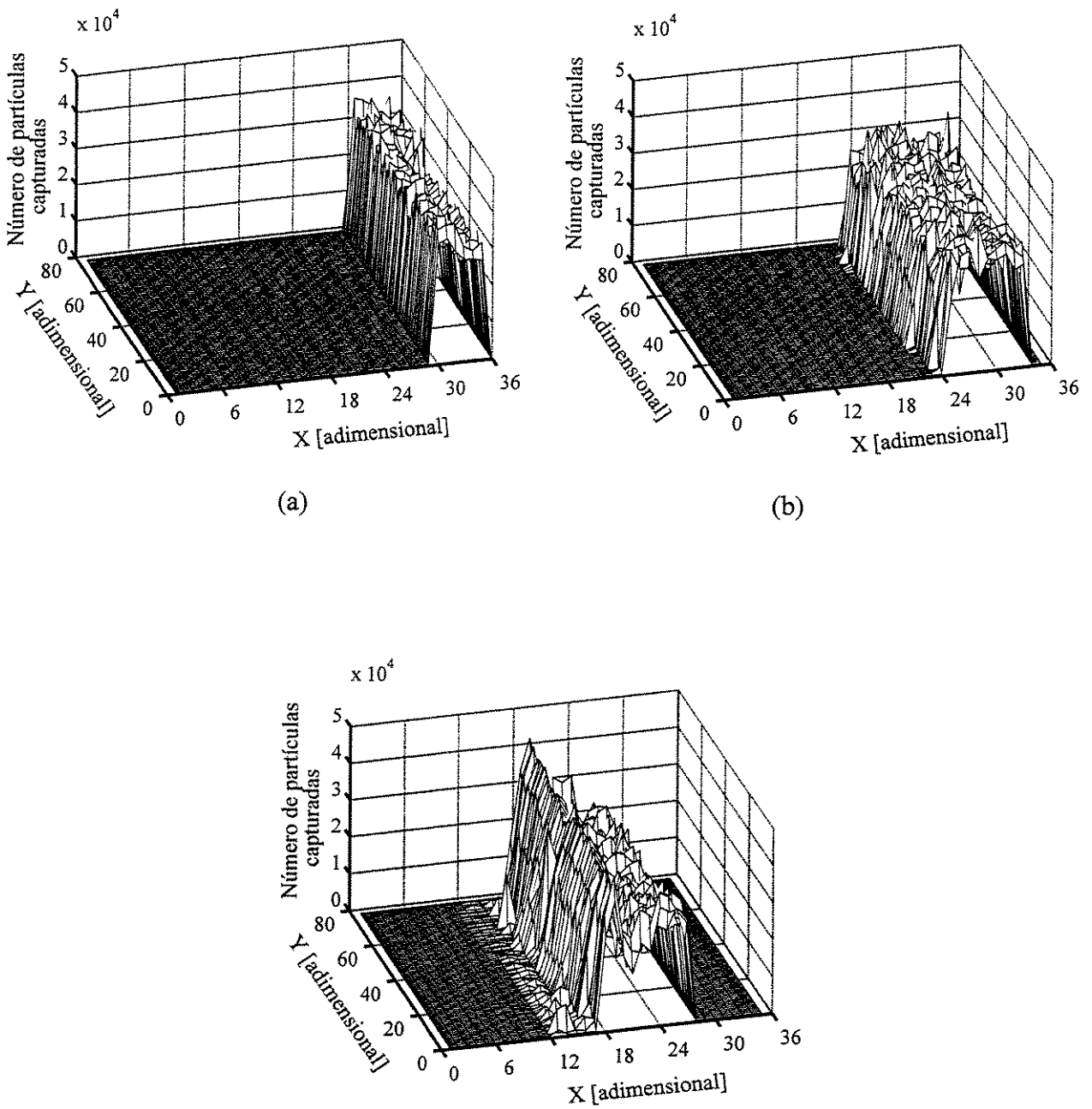



Figura 6.30 - Concentração espacial de partículas para diferentes configurações de empacotamento

### *6.4.1 Resultados das simulações 1, 2 e 3*

#### *6.4.1.1 Distribuição espacial de partículas*

Na Figura 6.31-a apresenta-se a distribuição espacial de partículas ao longo das direções X (representando a espessura do filtro) e Z (representando o comprimento do filtro), referente ao resultado da simulação 1. Observa-se que a presença de partículas ocorre marcadamente em posições de X variando entre 26 e 36, da ordem de $5x10^4$. Na Figura 6.31-b apresenta-se o modelamento gráfico da distribuição espacial de contaminantes referente à amostra 6, ou seja, um filtro de capacidade nominal de retenção de 50 μm, contaminado com partículas com diâmetro variando entre 62 μm e 74 μm. Percebe-se uma extrema semelhança entre os dois gráficos, isto é, o caso experimental também mostra que a maior parte das partículas se concentrou nas camadas externas do filtro, em regiões caracterizadas pelas máscaras de posições entre 24 e 36. Convém ressaltar que a comparação entre os gráficos mostrados na Figura 6.31 é, principalmente, qualitativa, pois o caso experimental expressa o número de *pixels* contendo partículas, enquanto que o caso simulado mostra o número de partículas.

O resultado da distribuição espacial para simulação 2, utilizando-se diâmetro das partículas entre 45 μm e 53 μm está mostrado na Figura 6.32-a. Pode-se notar que há presença de partículas em posições de X mais internas (a partir 22), quando comparado com o resultado da simulação 1. Esta tendência é explicada pelo fato de que sendo as partículas menores, tendem a se aprofundar mais no filtro. A mesma tendência é verificada pelo gráfico mostrado na Figura 6.32-b, onde se tem a distribuição espacial de contaminantes obtida experimentalmente, para a amostra 5, tendo a mesma especificação que a amostra 6, porém contaminado com partículas com diâmetro variando entre 45 μm e 53 μm. Nota-se, também, que no caso experimental, a escassez de partículas ocorre para máscaras de posições abaixo de 12, havendo uma relativa discrepância com relação à simulação. Esta discrepância pode estar associada ao fato de que, para o filtro real, o fator de empacotamento ao longo da espessura não obedece a uma função bem comportada, do tipo linear, por exemplo.

Para a simulação 3, o resultado está mostrado na Figura 6.33-a. Neste caso, foram usadas partículas com uma maior variabilidade de diâmetros, sendo de 1 μm a 74 μm. A distribuição de partículas ocorre praticamente em todas as posições de X. Porém, o número de partículas capturadas é menor, ou seja a eficiência do filtro é menor (73,3 %), contra 100 % referente aos casos das simulações 1 e 2. Poucas partículas atingiram as posições inferiores de X (abaixo de 10). No caso experimental relativo à amostra 7, mostrado na Figura 6.33-b, nota-se maior concentração em posições mais inferiores. Novamente, uma das razões para esta discordância pode estar relacionada com a descontinuidade da distribuição de α ao longo da espessura no filtro real.

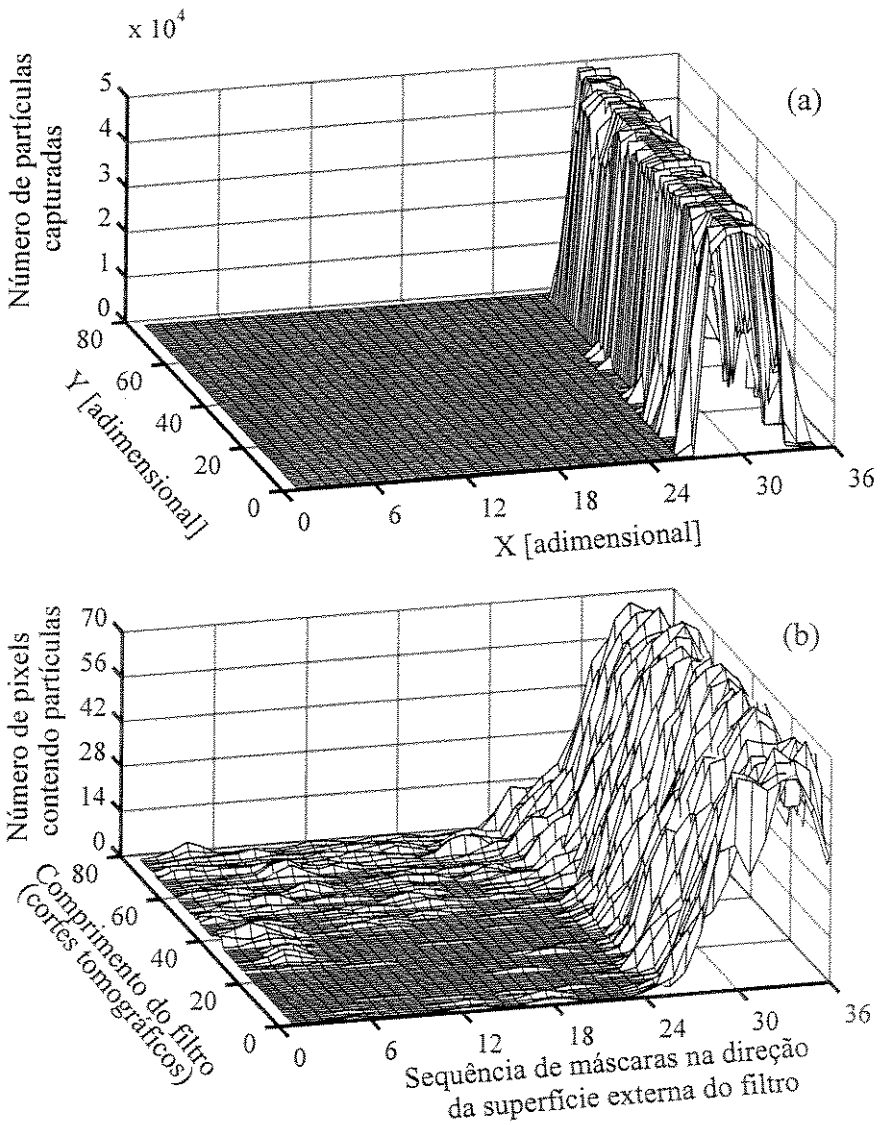



Figura 6.31 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 1, (b) ensaio experimental com a amostra 6

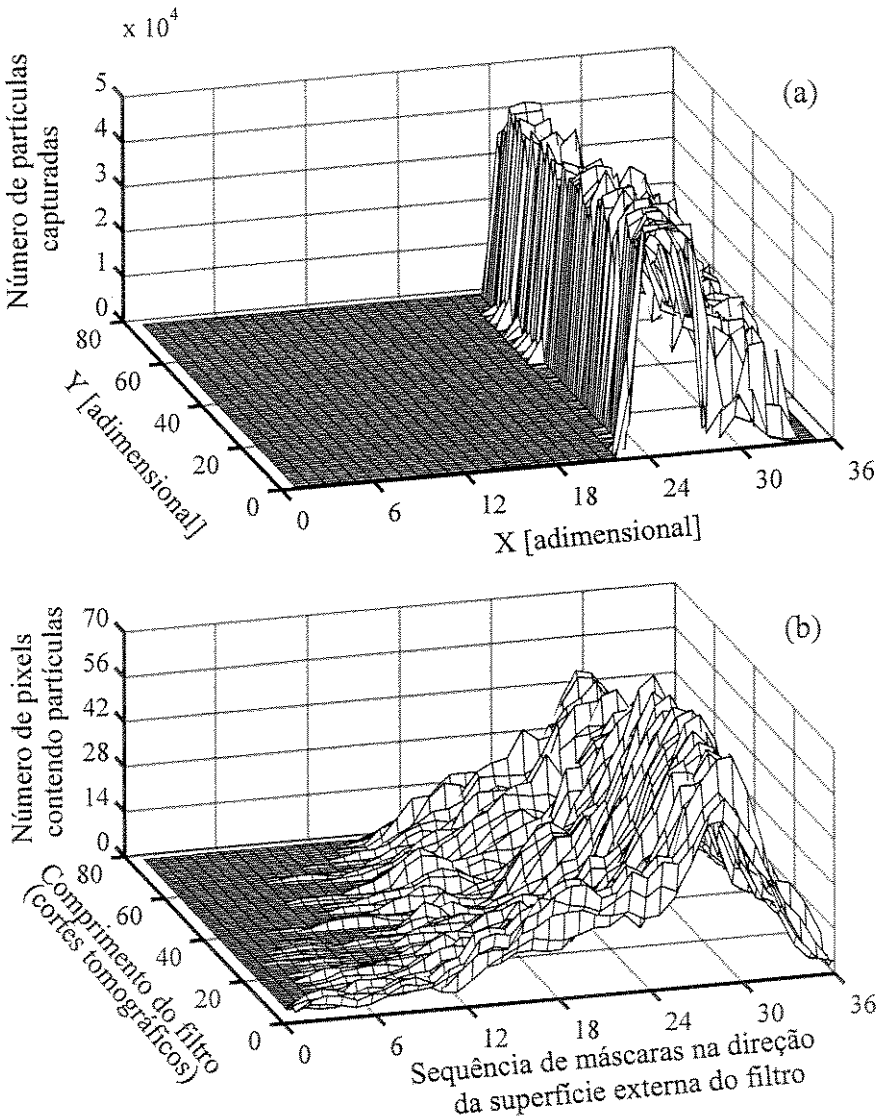



Figura 6.32 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 2, (b) ensaio experimental com a amostra 5

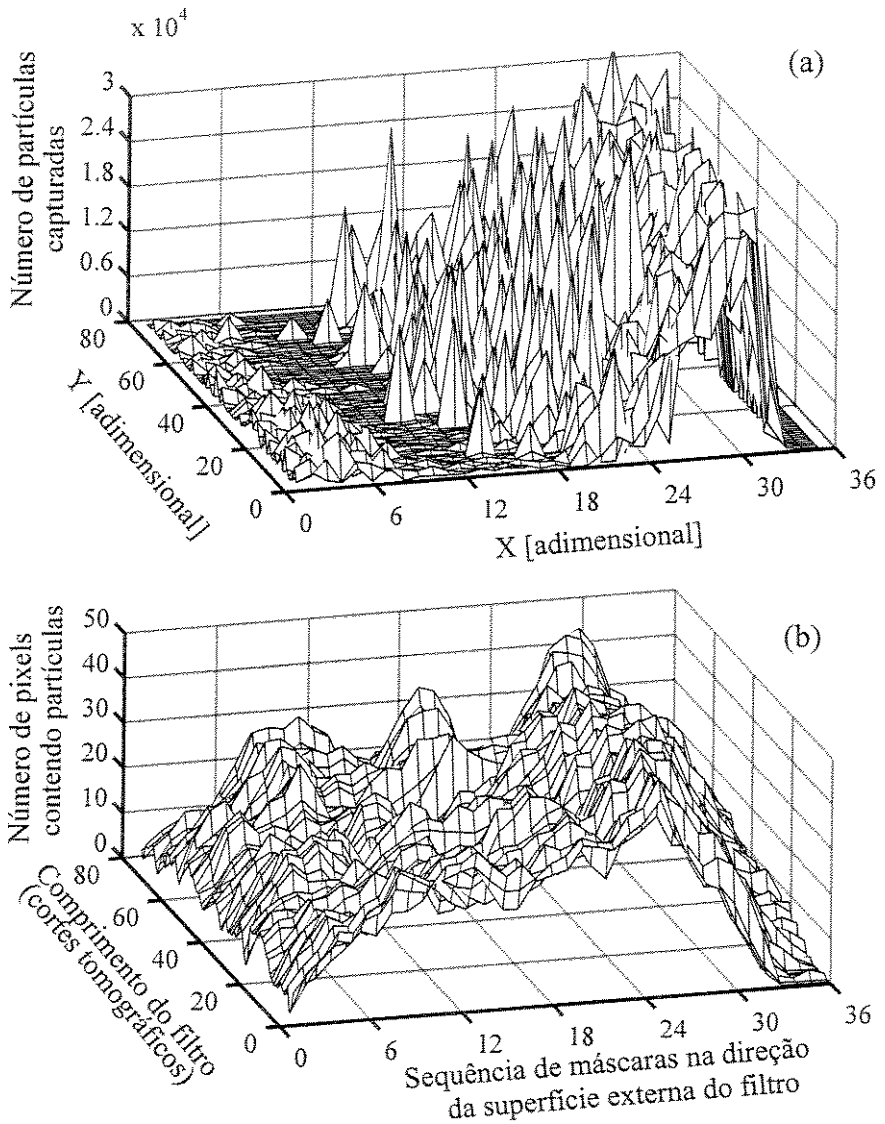



Figura 6.33 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 3, (b) ensaio experimental com a amostra 7

As distribuições acumuladas ao longo das posições radiais, para os três casos analisados anteriormente, podem ser vistas nas Figuras 6.34, 6.35 e 6.36, respectivamente. Para a obtenção destes perfis, normalizaram-se os dados em relação ao maior valor. Pela Figura 6.34, pode-se ver que tanto para o caso experimental quanto para o caso simulado, o perfil acumulado é praticamente zero entre as posições radiais 0 e 25, ou seja, apenas em 30 % da espessura do filtro é que se nota a presença de partículas. Pela Figura 6.35 nota-se que a presença de partículas já começa a ocorrer a partir da posição radial 22 (simulação) e se estende um pouco mais (até próximo de 10) para o caso experimental. Já na Figura 6.36, pode-se perceber que a distribuição atinge posições radiais mais baixas. Nota-se, também, que o perfil relacionado ao caso

experimental é superior ao caso simulado, fato possivelmente relacionado à heterogeneidade do filtro real, não obedecendo a uma distribuição linear do parâmetro α.

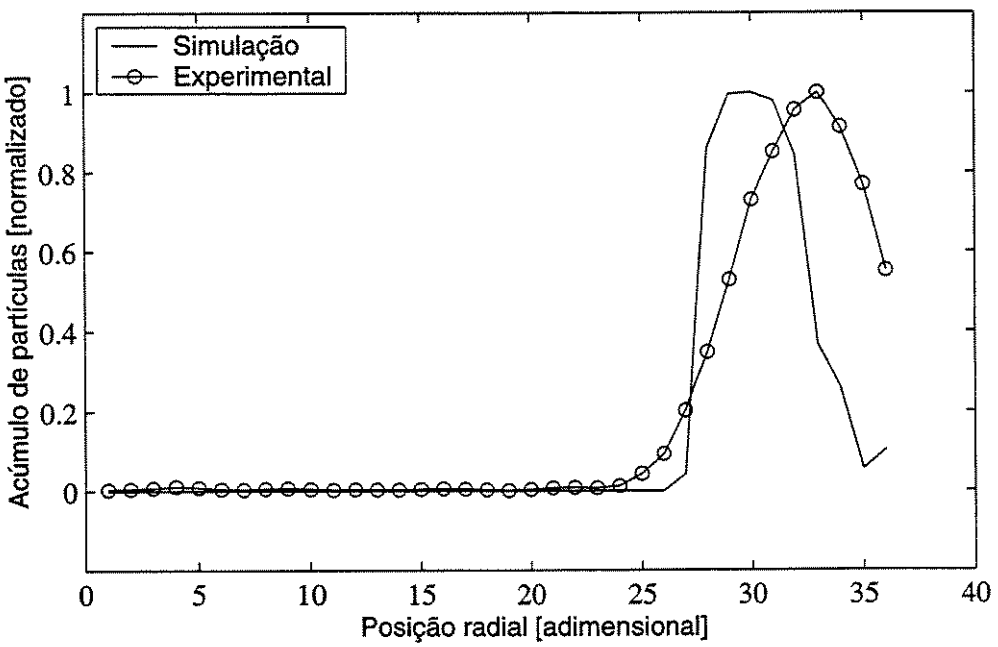



Figura 6.34 - Perfil de distribuição ao longo da espessura para a simulação 1 e ensaio experimental com a amostra 6

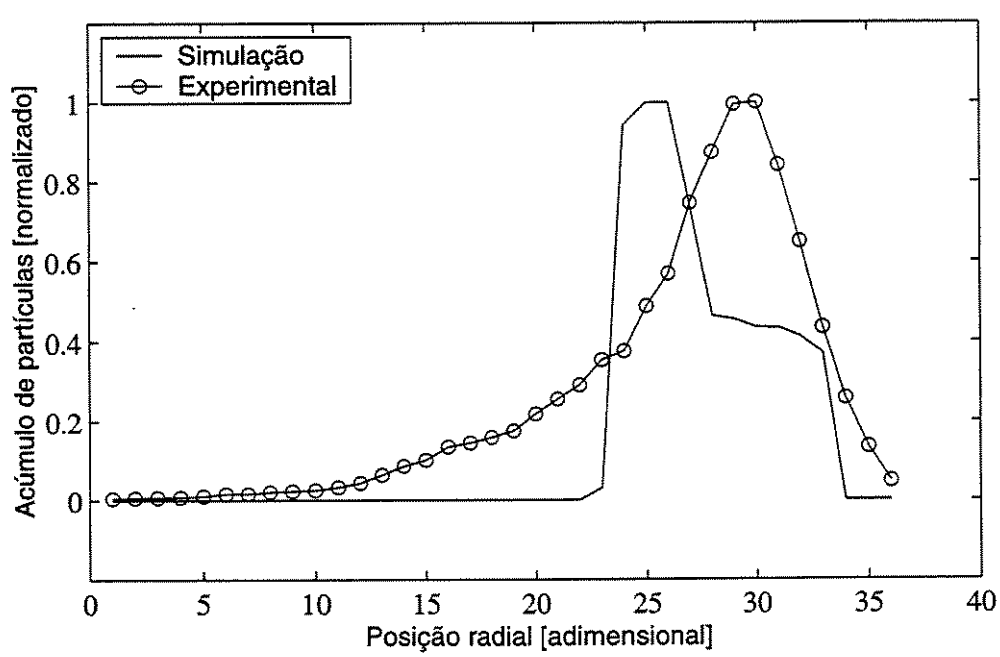



Figura 6.35 - Perfil de distribuição ao longo da espessura para a simulação 2 e ensaio experimental com a amostra 5

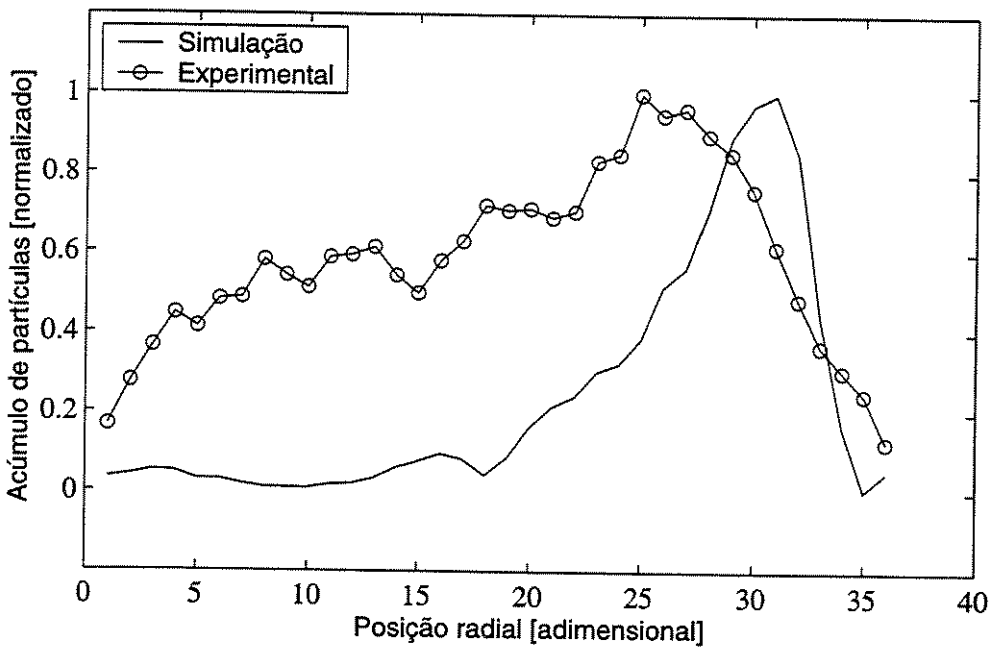



Figura 6.36 - Perfil de distribuição ao longo da espessura para a simulação 3 e ensaio experimental com a amostra 7

*6.4.1.2 Redução da permeabilidade*

Na Figura 6.37 são apresentadas as curvas de redução de permeabilidade para os casos das simulações 1, 2 e 3, as quais estão representadas por linhas, e para os ensaios experimentais com as amostras 5, 6 e 7, representados por símbolos. Pode-se observar inicialmente que, levando-se em conta a permeabilidade final, a redução é menor para o caso da simulação 1, para a qual foram atribuídos diâmetros maiores para as partículas. À medida que se aglomeram, partículas maiores tendem a formar maiores espaços intersticiais, ao passo que partículas menores tendem a formar aglomerados mais compactos, o que pode explicar a maior redução verificada para a simulação 2, para a qual foram usados diâmetros entre 45 μm e 53 μm, contra 62 μm a 74 μm relativo à simulação 1. Uma ocorrência intermediária pode ser notada para a situação onde se usa uma distribuição de diâmetros mais heterogênea, que é caso da simulação 3 (partículas de 1 μm a 74 μm). Como neste caso a distribuição espacial no interior do filtro é mais homogênea, a resistência à passagem do fluido ocorre de forma mais distribuída, à medida que as partículas se acumulam.

Para os casos experimentais, verifica-se a mesma tendência apresentada pelo modelo numérico, ou seja, na amostra contaminada com partículas de diâmetros maiores (amostra 6), a redução de permeabilidade é menor do que em relação à amostra 5. Porém, no início da filtração, a amostra 6, contaminada com partículas maiores (entre 62 e 74 μm) apresenta maior redução de permeabilidade. Isto pode estar relacionado ao fato de que as partículas maiores tendem a causar maior obstrução dos poros, provocando uma maior redução da porosidade que, por sua vez, causa uma maior redução da permeabilidade. No estágio final da filtração, uma vez que começa a se formar a torta de filtração para ambas as amostras (5 e 6), o efeito da torta passa a prevalecer e, aquela mais densa (relativa à amostra 5), passa a provocar maior redução na permeabilidade. A torta mais densa significa que os espaços intersticiais formados entre as partículas são menores, aumentando a resistência ao escoamento.

Durante a realização dos experimentos de contaminação dos filtros, não foi possível a reutilização da mesma amostra para um outro teste, devido à impossibilidade de se remover o contaminante dos elementos já contaminados. Portanto, foram usados filtros com as mesmas especificações, a fim de se fazer as comparações. Desta forma, um outro fator que poderia ter influenciado o aspecto das curvas da Figura 6.37, é o fato de que um filtro com uma determinada especificação não é exatamente igual a um outro com a mesma especificação, levando-se em conta, principalmente, seus aspectos microestruturais.

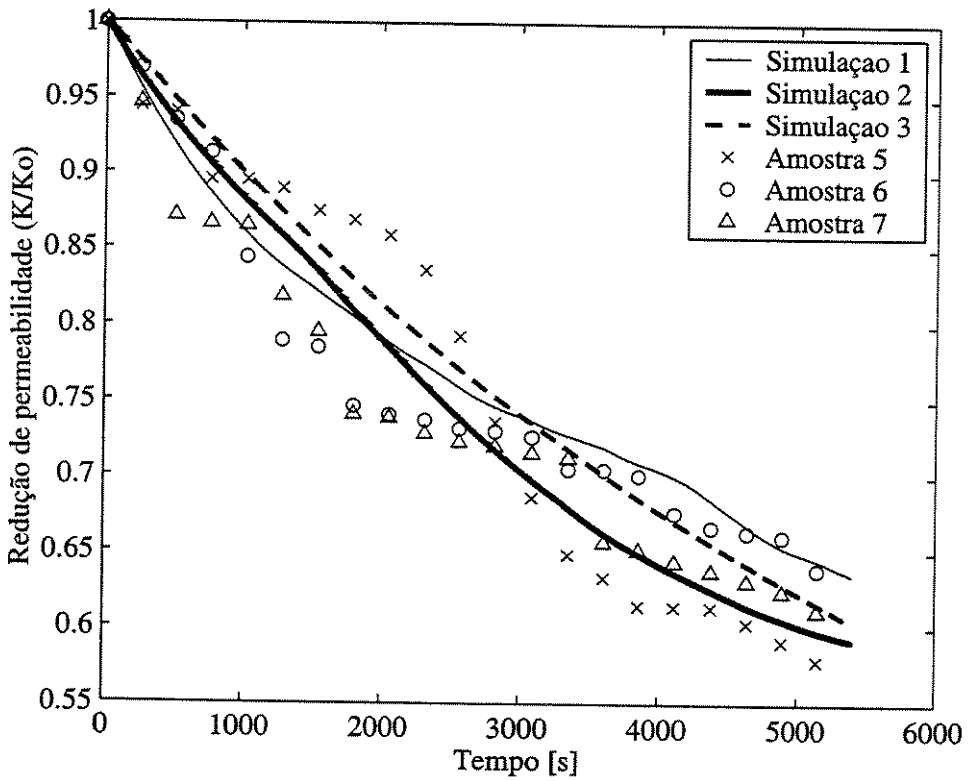



Figura 6.37 - Curvas de redução de permeabilidade para as simulações 1, 2 e 3 (linhas) e para os ensaios experimentais com as amostras 5, 6 e 7 (símbolos)

*6.4.1.3 Partículas capturadas ao longo do tempo*

Na Figura 6.38 estão apresentados os gráficos das partículas capturadas ao longo do tempo de simulação, para os casos 1 e 2. Percebe-se que curva é constante, o que significa, para estes casos, que todas as partículas injetadas em um determinado *time step* foram capturadas, expressando 100 % de eficiência.

Na Figura 6.39 está mostrado o perfil do número de partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 3. Pode-se ver, neste caso, que a partir da segunda metade do tempo de simulação há um significativo aumento do número de partículas capturadas, ou seja, há um aumento na eficiência de captura. Neste caso, como a variabilidade do tamanho das partículas é relativamente grande (1 μm a 74 μm), há uma indicação de que as partículas maiores, já capturadas pelo filtro, passam a atuar como filtros secundários às partículas menores, ou seja,

ocorre com maior intensidade o efeito de ponte, quando duas ou mais partículas interrompem a passagem de outra, geralmente menor.

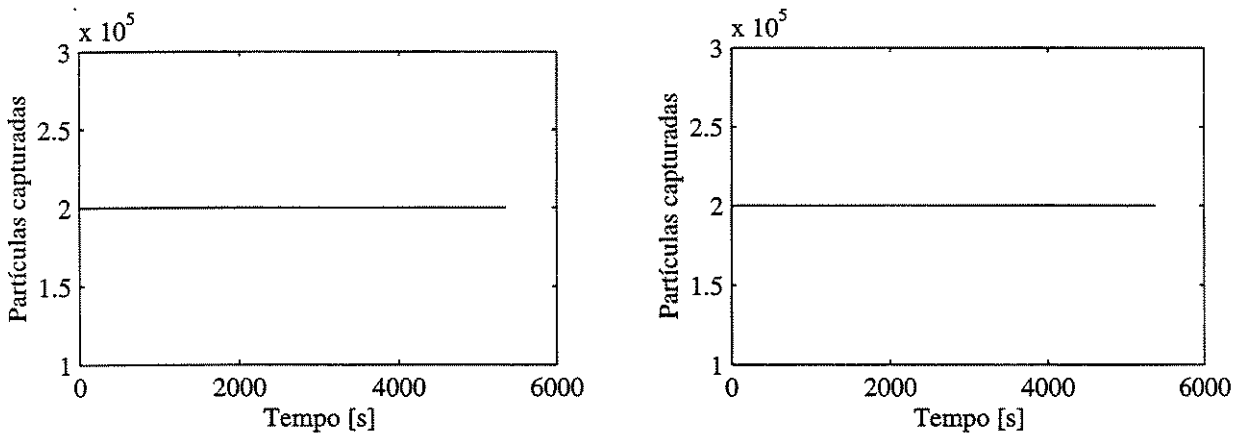



Figura 6.38 - Número de partículas capturadas ao longo do tempo: simulações 1 e 2

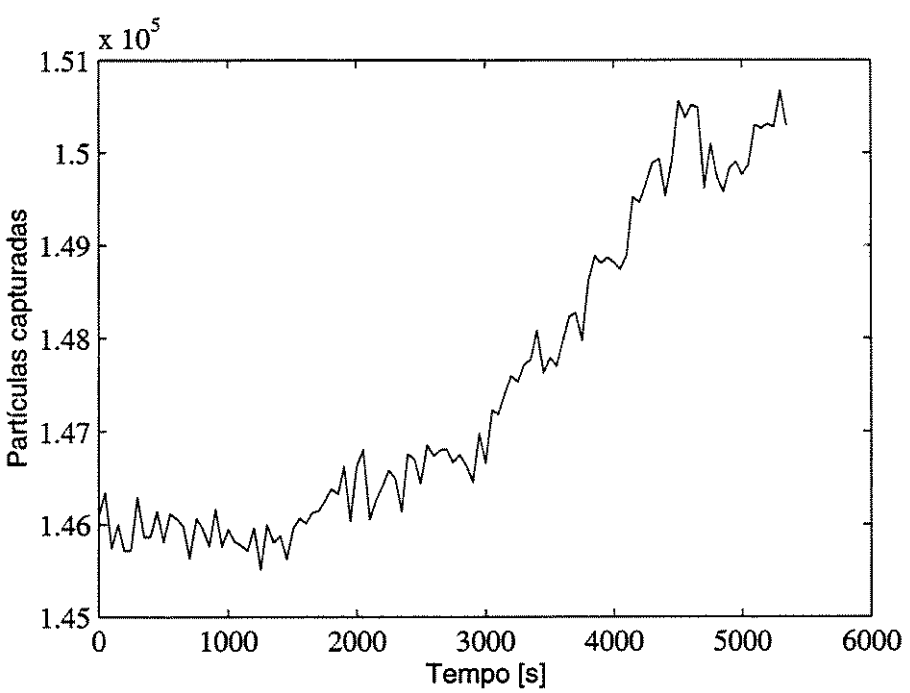



Figura 6.39 - Número de partículas capturadas ao longo do tempo: simulação 3

### *6.4.2 Resultados das simulações 4, 5 e 6*

#### *6.4.2.1 Distribuição espacial de partículas*

Nas Figuras 6.40-a, 6.41-a e 6.42-a estão apresentados os gráficos da distribuição espacial de partículas referentes às simulações 4, 5 e 6, respectivamente. Para estas simulações foram usadas as mesmas distribuições de partículas usadas nas simulações 1, 2 e 3, porém, foram alterados os parâmetros referentes à distribuição de fibras no filtro. Inicialmente, o resultado destas simulações mostra que a concentração de partículas ocorre preferencialmente em posições intermediárias de X. No caso da simulação 4 (diâmetros de partículas variando entre 45 e 53 μm) há uma predominância entre as posições 8 e 20 referentes à direção X. Já no caso da simulação 5 (diâmetros de partículas variando entre 62 e 74 μm), ocorre uma predominância entre as posições 12 e 28, ou seja, mais externas em relação ao caso da simulação 4. O resultado da simulação 6 mostra que há uma concentração em posições mais internas de X (próximas de 0). Neste caso, uma vez que foram atribuídos diâmetros variando entre 1 μm e 74 μm, partículas menores atingiram estas posições inferiores de X.

Comparando-se o resultado da simulação 4 com o resultado da amostra 2 (6.40-b), pode-se observar tendências similares de acúmulo entre as posições radiais 6 e 24 (na amostra 2) e entre 8 e 20, na simulação. No caso da Figura 6.41 não se nota uma concordância entre os gráficos, pois observa-se que no caso experimental houve um acúmulo em praticamente todas as posições radiais, exceto nas posições delimitadas pelas máscaras entre 24 e 36 e cortes tomográficos entre 0 e 40, onde se nota ausência de contaminantes, o que pode ter sido causado pela influência do campo gravitacional, uma vez que neste caso usou-se partículas maiores e, portanto, mais pesadas.

No caso da Figura 6.42, apesar de serem usadas partículas com diâmetros bastante variados, há uma tendência de acúmulo em regiões intermediárias, tanto no caso da simulação quanto no caso experimental, apesar de que no caso experimental há uma maior concentração nas bordas (tanto internas quanto externas) em relação à simulação.

De uma forma geral, os resultados apresentados nesta sub-seção, demonstram que o tipo de filtro analisado apresenta uma certa tendência de acumular partículas em regiões intermediárias relativas à espessura. Uma tendência similar foi verificada com os resultados das simulações.

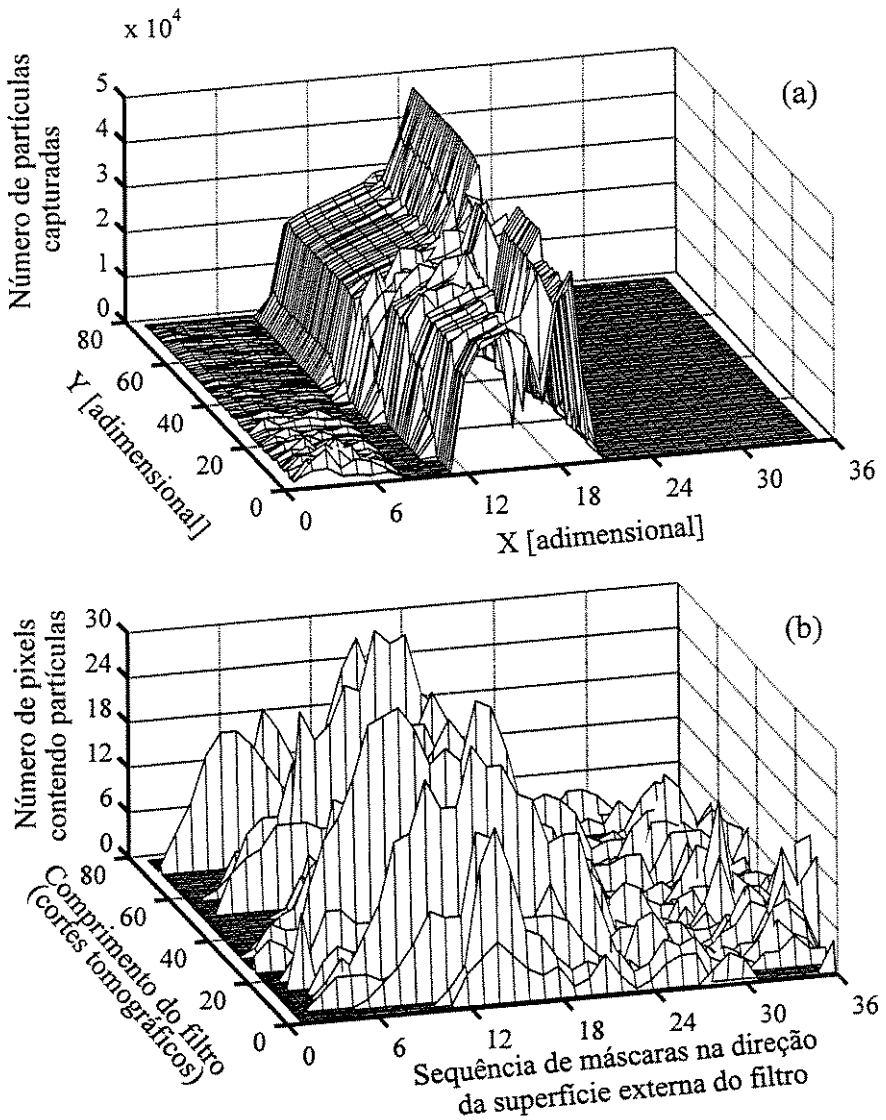



Figura 6.40 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 4, (b) ensaio experimental com a amostra 2

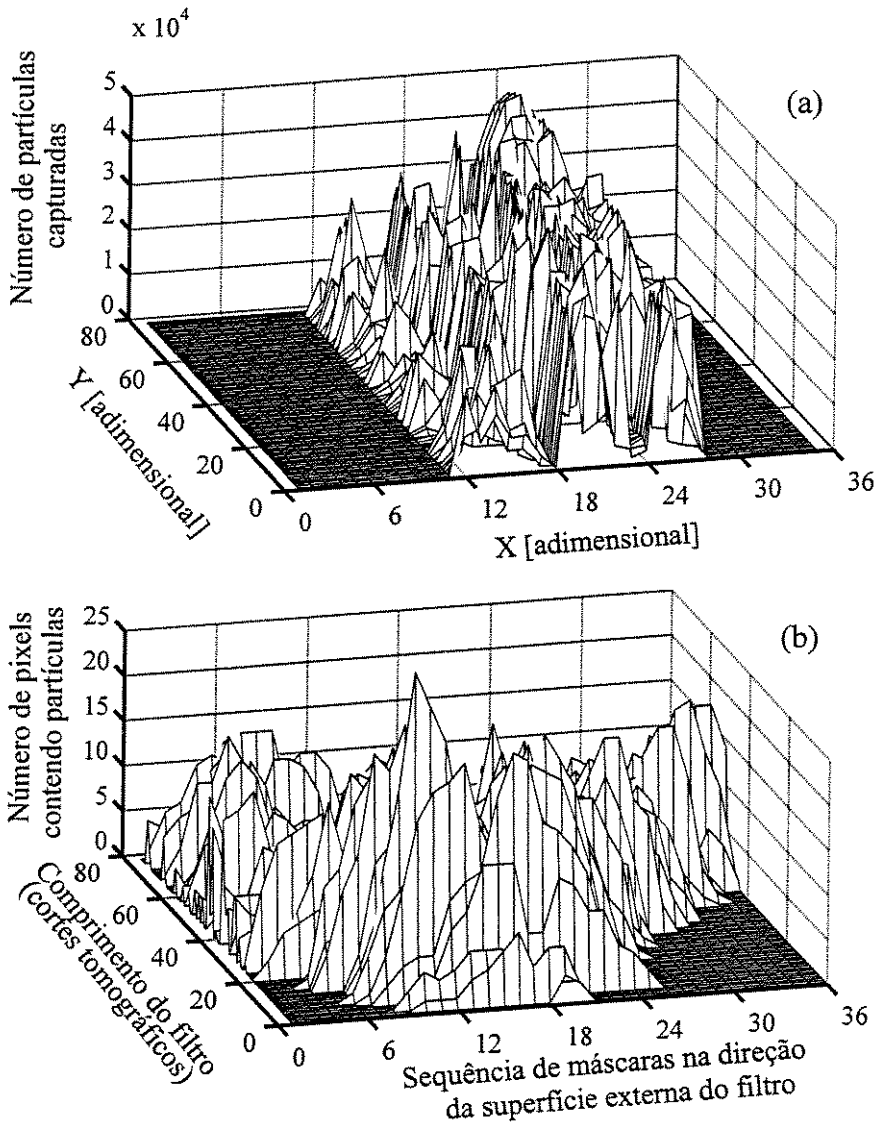



Figura 6.41 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 5, (b) ensaio experimental com a amostra 3

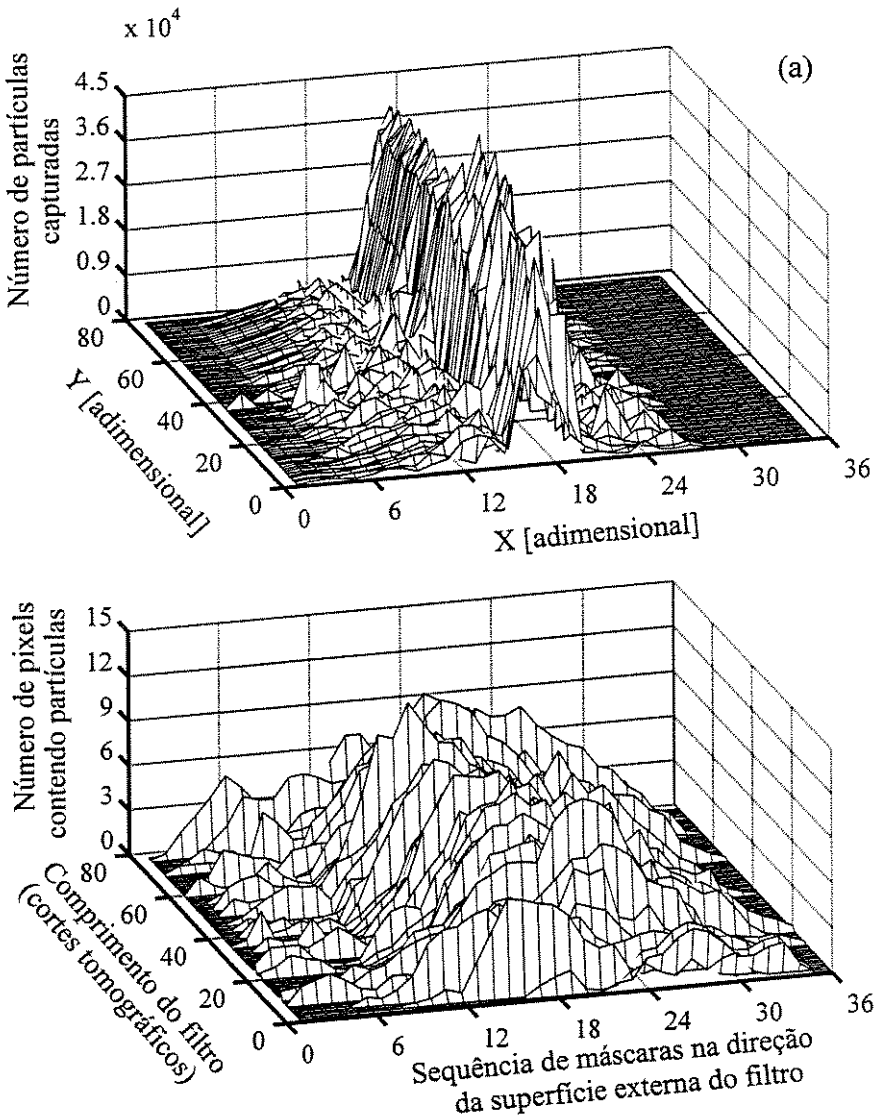



Figura 6.42 - Modelamento da distribuição espacial de partículas: (a) simulação 6, (b) ensaio experimental com a amostra 8

*6.4.2.2 Redução de permeabilidade*

São apresentadas, na Figura 6.43, as curvas de redução de permeabilidade para as simulações 4, 5 e 6 (representadas por linhas) e as curvas de redução de permeabilidade para os casos experimentais referentes às amostras 2, 3 e 8 (representadas por símbolos). Nestes casos verifica-se que a redução global é menor do que para os casos apresentados na Figura 6.37. A máxima redução foi em torno de 30 %, enquanto que referente aos casos mostrados na Figura 6.37, a redução global máxima chegou em torno de 40 %. Isto leva a se considerar que os filtros com fibras distribuídas aleatoriamente provocam uma maior redução na permeabilidade.

Comparativamente, a simulação 6 (53,3 % de partículas capturadas) foi a que apresentou menor redução de permeabilidade. A maior redução foi verificada para o caso da simulação 4 (92,2 % de partículas capturadas). Uma situação intermediária é notada para o caso da simulação 5 (100 % de partículas capturadas). Nestes casos, a redução de permeabilidade está mais vinculada à quantidade de partículas capturadas. Uma tendência similar pode ser notada em relação aos casos experimentais. A amostra 8 (menor quantidade de partículas) apresentou a menor queda de permeabilidade. A amostra 2 (maior quantidade de partículas) apresentou a maior queda. E, a amostra 3, apresentou uma queda intermediária.

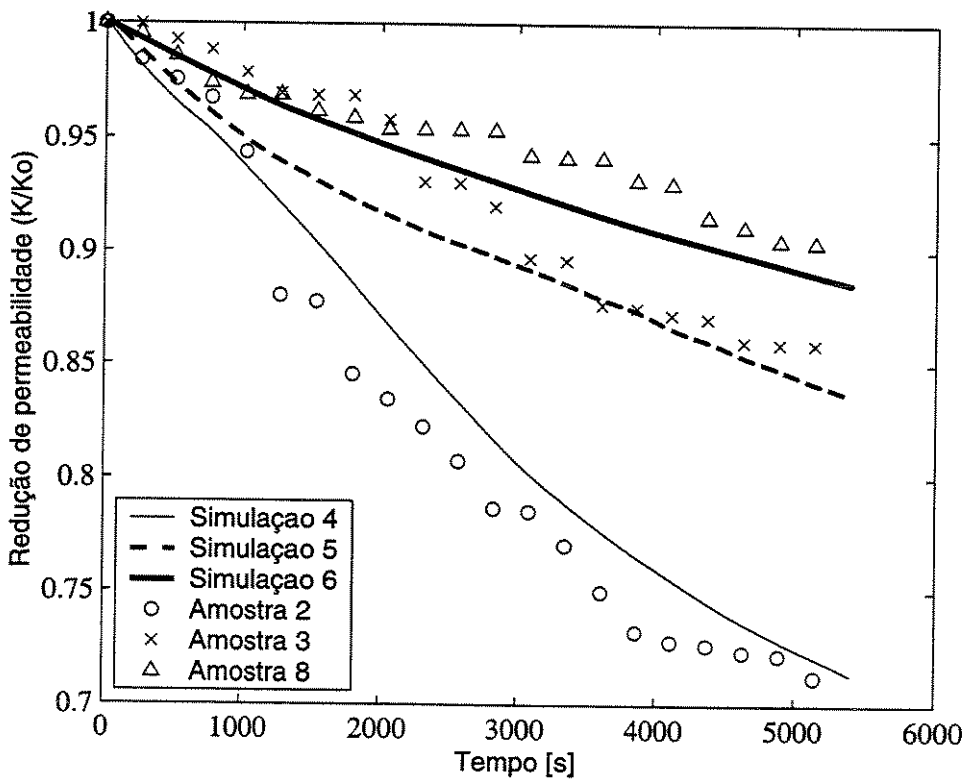



Figura 6.43 - Curvas de redução de permeabilidade para as simulações 4, 5 e 6 (linhas) e para as amostras 2, 3 e 8 (símbolos)

*6.4.2.3 Partículas capturadas ao longo do tempo*

Nas Figuras 6.44, 6.45 e 6.46 mostra-se a evolução do tempo de filtração e o respectivo número de partículas capturadas, para as simulações 4, 5 e 6, respectivamente. Pode-se notar que no caso da simulação 4, até os primeiros 700 segundos, aproximadamente, há uma rápida aceleração na eficiência de captura, estabilizando em 100 % a partir de então. Este

comportamento sugere que, no início da simulação, partículas menores dentro da faixa utilizada não são capturadas. À medida que algumas partículas vão sendo capturadas, a porosidade tende a diminuir, o que faz com que no decorrer da simulação, partículas menores, que não eram capturadas, passam a ser. Como a faixa é relativamente pequena, o processo estabiliza no restante do tempo, ou seja, a partir de um certo instante, atinge-se uma condição de porosidade (e permeabilidade) na qual todas as partículas são capturadas. No caso da simulação 5, como os diâmetros são maiores, há 100 % de eficiência durante toda a simulação.

Já no caso da simulação 6, há um crescimento do número de partículas capturadas durante toda a simulação do processo de filtração, sugerindo que a eficiência para as partículas pequenas aumentou continuamente. No início, supõe-se que apenas partículas maiores sejam capturadas. Se não houvesse um crescimento da eficiência para partículas menores, esperaria-se que a curva se mantivesse aproximadamente constante.

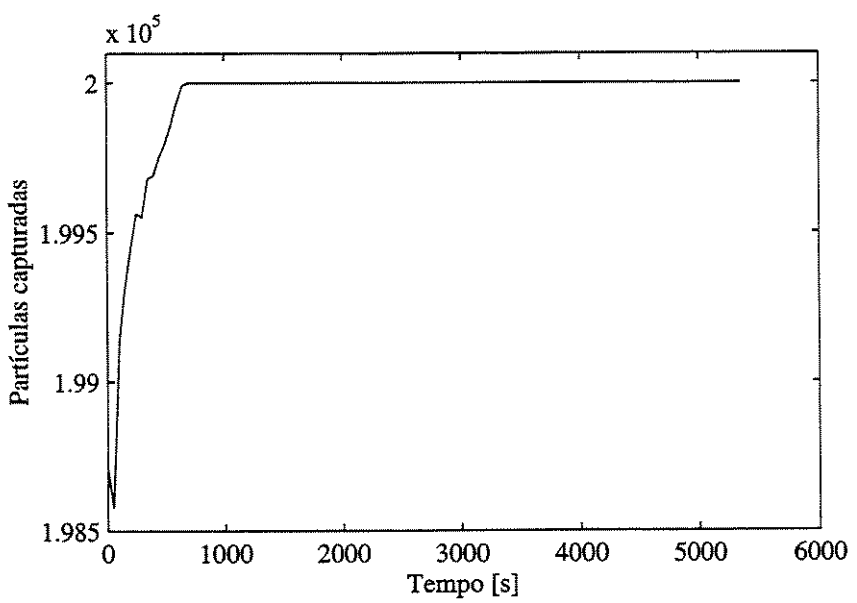



Figura 6.44 - Partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 4

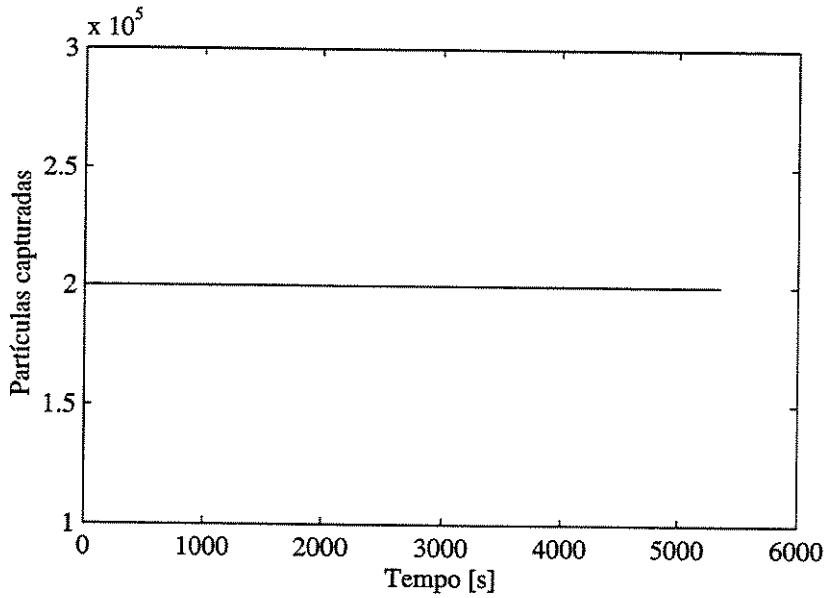



Figura 6.45 - Partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 5

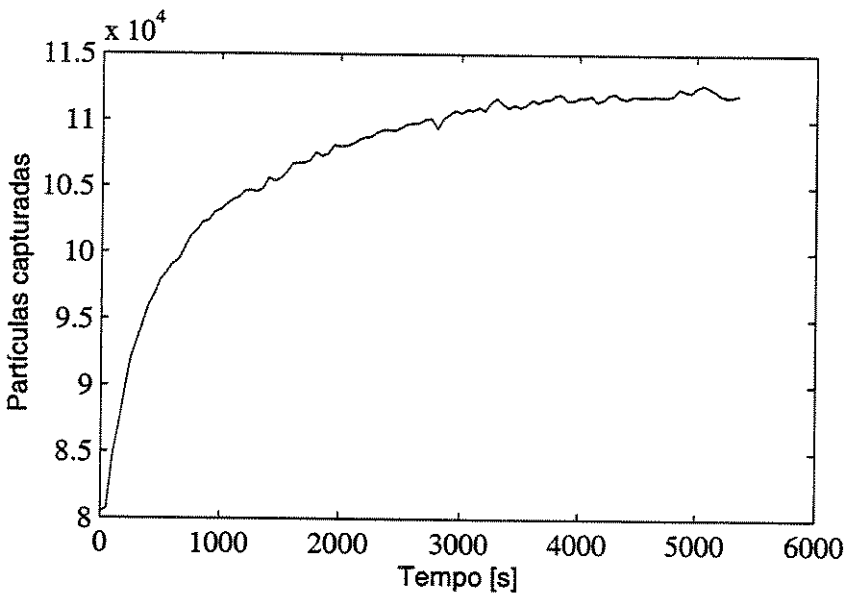



Figura 6.46 - Partículas capturadas ao longo do tempo para a simulação 6

### *6.4.3 Influência do diâmetro da fibra*

Na Tabela 6.3 são apresentados os parâmetros relativos às simulações 7 a 10. O objetivo dessas simulações é a verificação do modelo com relação à influência de fatores tais como diâmetro da fibra, densidade das partículas e fator empacotamento.

Tabela 6.3 - Parâmetros utilizados nas simulações 7 a 14

| Parâmetros | | Número da simulação | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Discretização da malha | m | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| | n | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 | 36 |
| Diâmetro da fibra, DF [μm] | | 40 | 35 | 30 | 50 | 35 | 35 | 35 | 35 |
| Orientação das fibras | Tipo | ordenado | | | | | | | |
| | θ | entre 0° e 90° | | | | | | | |
| | ψ | entre 0° e 90° | | | | | | | |
| Fator de empacotamento | $\alpha_{mín.}$ | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,005 | 0,010 | 0,008 | 0,006 | 0,004 |
| | $\alpha_{máx.}$ | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,025 | 0,050 | 0,040 | 0,030 | 0,020 |
| Número de partículas injetadas a cada *time step* | | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 | 4000 |
| Diâmetro das partículas | $D_{Pmín.}$ [μm] | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | $D_{Pmáx.}$ [μm] | 74 | 74 | 74 | 74 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Tempo de simulação [s] | | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 | 5400 |

Primeiramente, são apresentados os resultados relativos à distribuição espacial de partículas. Estes resultados estão mostrados nas Figuras 6.47, 6.48 e 6.49, que referem-se às simulações de número 7, 8 e 9, respectivamente. De uma forma geral, verifica-se que quanto menor o diâmetro das fibras, menor é a penetração das partículas, ou seja, há uma maior tendência das partículas serem retidas nas camadas mais externas do filtro, fato mais destacado pelo gráfico mostrado na Figura 6.49. Uma vez que o fator de empacotamento (densidade das fibras) foi o mesmo nas três simulações, fibras mais finas promovem espaços mais compactados na rede porosa (ou seja, menor porosidade). Por outro lado, fibras mais grossas tendem a formar filtros com maior porosidade, nos quais parte das partículas tende a atingir camadas mais profundas.

Os gráficos mostrados nas Figuras 6.47, 6.48 e 6.49, demonstram, ainda, que a concentração na direção do eixo Y, que representa o comprimento do filtro, é caracterizada por vários picos. Isto demonstra que o modelo revela um comportamento similar ao que foi visto em resultados anteriores, por meio dos dados tomográficos. Ou seja, há uma considerável anisotropia também na direção do comprimento do filtro.

Na Figura 6.50 mostra-se o gráfico das partículas capturadas ao longo do tempo para as simulações 7, 8 e 9. Primeiramente, nota-se que no caso da simulação 9 há a captura do maior número de partículas e, no caso da simulação 7, há a captura do menor número de partículas, sendo que no caso da simulação 8, há uma situação intermediária. Pode-se notar, também, que a diferença entre o número de partículas capturadas é bem maior no início do tempo de simulação. Principalmente no caso da simulação 7 mostra-se que, à medida que o processo se desenvolve, há um crescimento da capacidade de retenção. Isto pode ser explicado pelo fato de que, sendo a porosidade relativamente maior (simulação 7), no início, menos partículas são capturadas. À medida que os poros vão acomodando partículas, estes vão sendo parcialmente obstruídos, capturando com maior facilidade as próximas partículas.

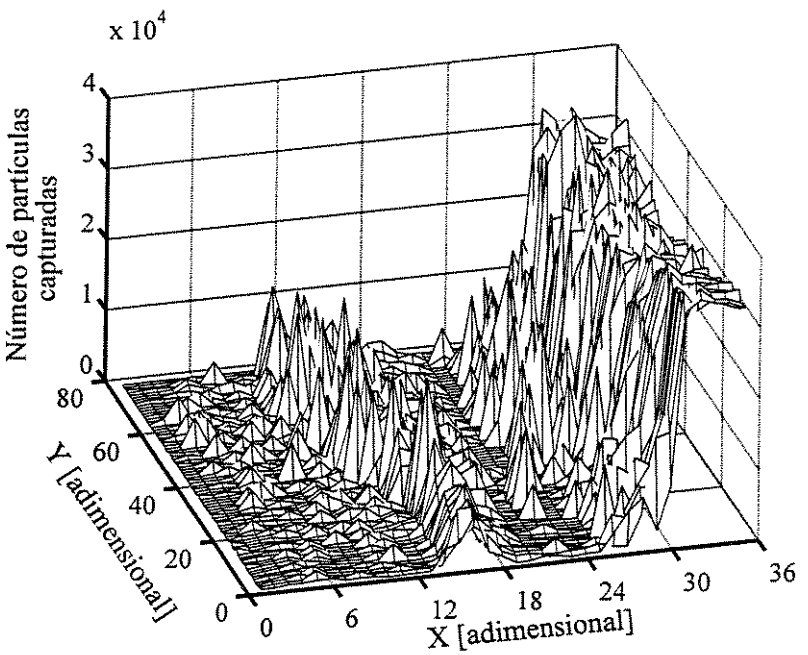



Figura 6.47 - Distribuição espacial de partículas referente à simulação 7

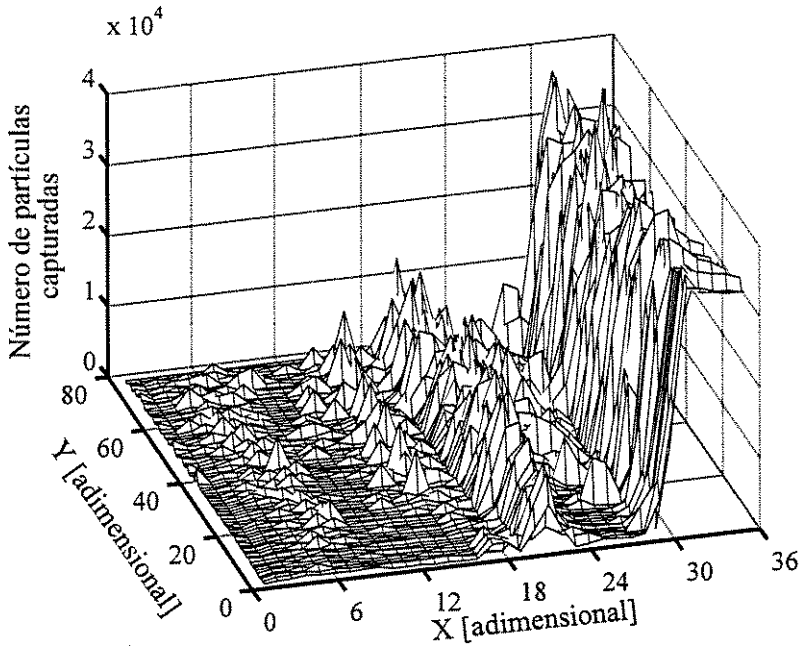



Figura 6.48 - Distribuição espacial de partículas referente à simulação 8

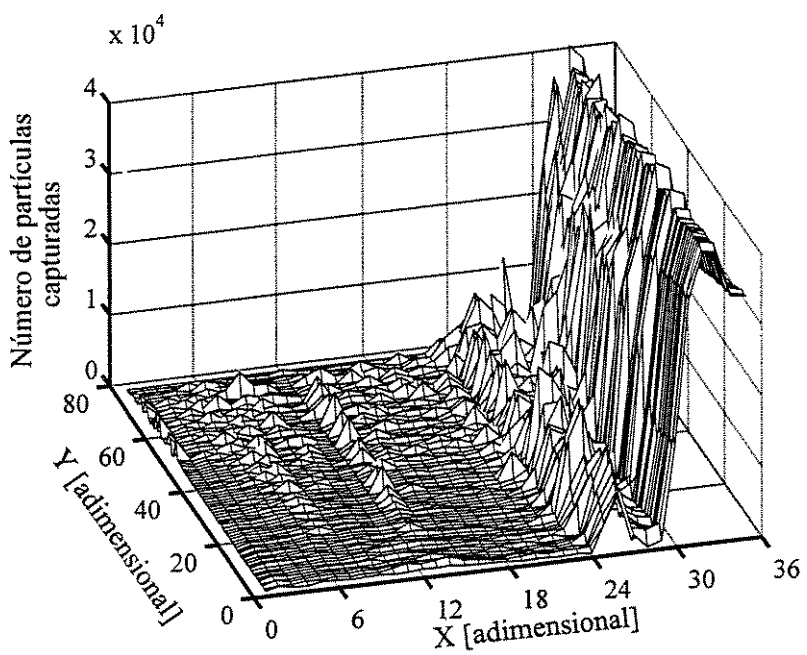



Figura 6.49 - Distribuição espacial de partículas referente à simulação 9

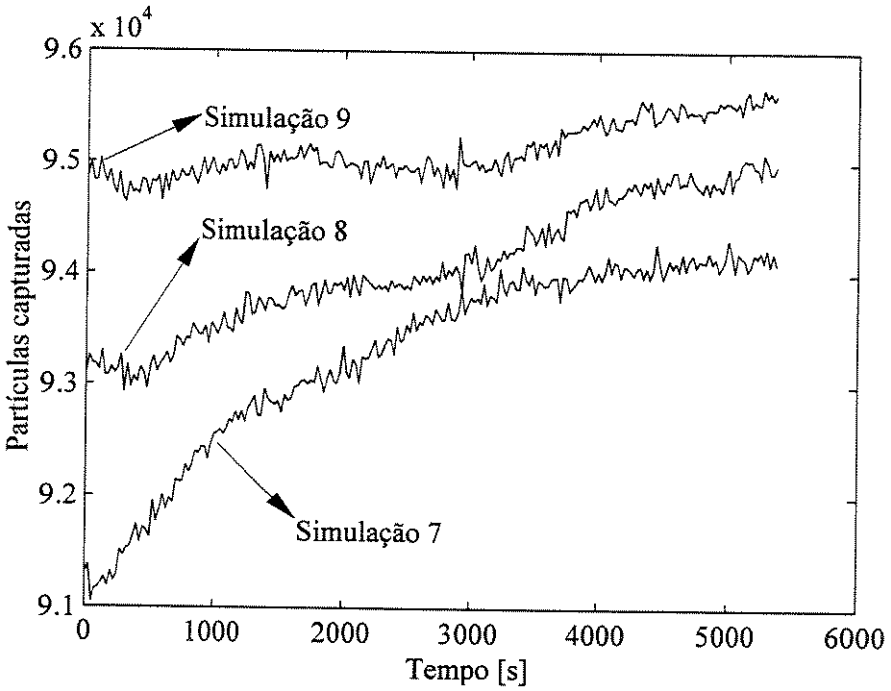



Figura 6.50 - Partículas capturadas ao longo do tempo para as simulações 7, 8 e 9

### *6.4.4 Influência da densidade das partículas*

Foi realizada uma outra simulação (simulação 10), com os mesmos parâmetros da simulação 6, porém, utilizando-se um outro valor para a densidade das partículas (3950 kg/m$^3$), contra 2650 kg/m$^3$ no caso da simulação 6. A eficiência foi determinada através da relação entre o número de partículas injetadas e o número de partículas capturadas, ao final das simulações. No caso da simulação 10, a eficiência foi de 70,3 % e no caso da simulação 6, foi de 53,5 %. A densidade das partículas influencia o número de Stokes (St, Equação 3.16, do modelo de filtração - capítulo 3) que, por sua vez, influencia a eficiência devida ao mecanismo da impactação (Equação 3.20). Pode-se ver, por esta Equação, que um aumento de St provoca um aumento da eficiência ($\eta_I$).

Na Figura 6.51 , podem ser vistos os gráficos relativos à distribuição espacial de partículas relativos à simulação 6 (a) e à simulação 10 (b). Percebe-se que no caso da simulação 6, há uma maior tendência das partículas se concentrarem na região central, entre as posições de 12 e 24 (eixo X) aproximadamente. No caso da simulação 10, a concentração é relativamente mais homogênea.

O histórico de captura de partículas pode ser visto na Figura 6.52. Há uma considerável diferença entre os dois casos. As partículas com maior densidade (simulação 10) são capturadas em maior número durante toda a simulação do processo, fato que também se deve à maior eficiência devido à influência de St, como mencionado anteriormente.

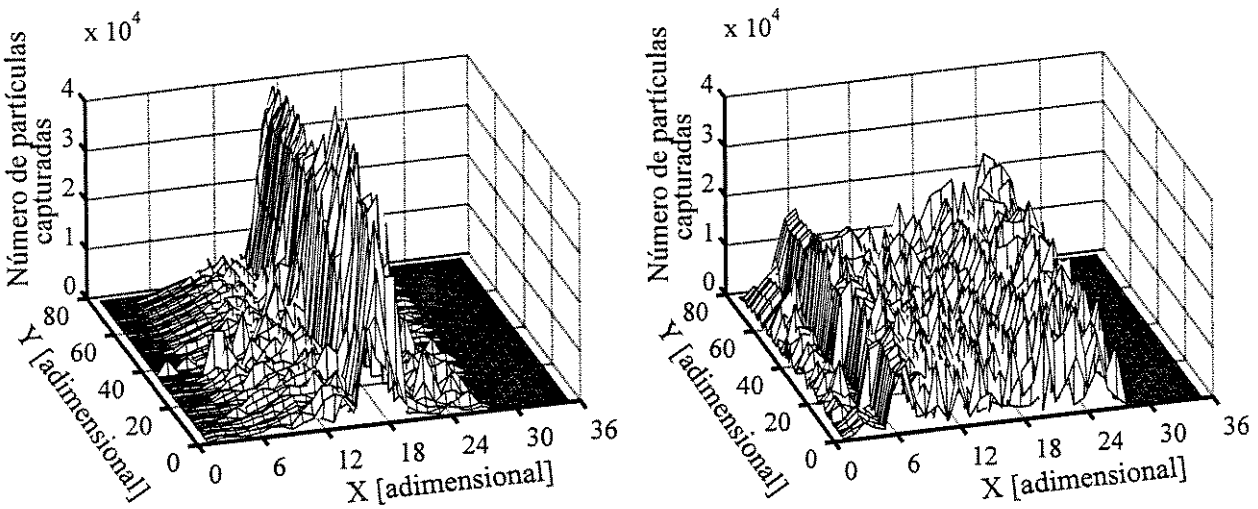



Figura 6.51 - Concentração espacial de partículas para as simulações 6 (a) e 10 (b)

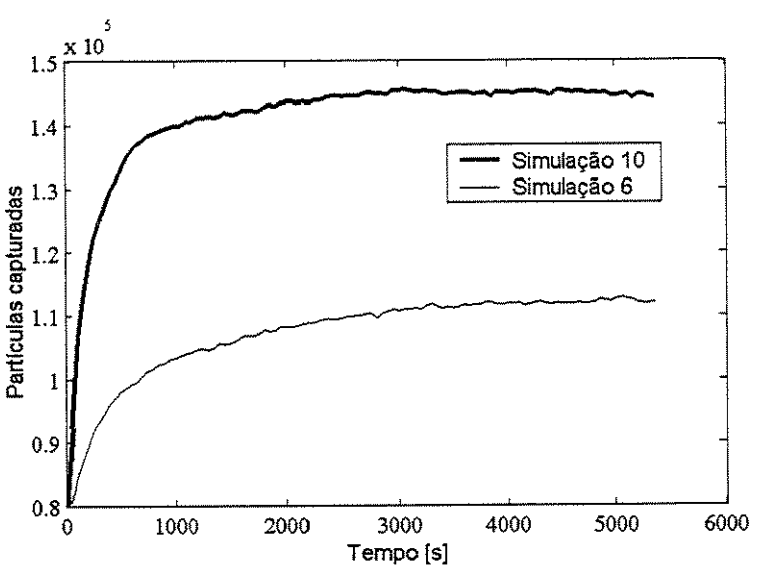



Figura 6.52 - Partículas capturadas ao longo do tempo para as simulações 6 e 10

### *6.4.5 Influência do fator de empacotamento*

Foram feitas quatro simulações com o objetivo de se verificar a influência do fator de empacotamento ($\alpha$) na eficiência de captura de partículas. Na Tabela 6.4 apresenta-se as eficiências percentuais referentes às simulações 11, 12, 13 e 14. As eficiências foram determinadas através da razão entre o número total de partículas capturadas e o número total de partículas injetadas. Percebe-se claramente que quanto menor é o valor de $\alpha$, menor é a eficiência, ou seja, menores valores de $\alpha$ significam que o filtro é mais "aberto", deixando passar uma maior quantidade de partículas. Percebe-se, ainda, que uma alteração no valor de $\alpha$ de 0,010 para 0,004 implica na redução da eficiência de 78,57 % para 42,01 %. Ou seja, a eficiência cai praticamente pela metade. Vale lembrar que estes valores são relativos aos tamanhos de partículas usados nas simulações, ou seja, diâmetros distribuídos entra 1 μm e 50 μm.

Tabela 6.4 - Eficiência em função do fator de empacotamento

| Simulação | 11 | 12 | 13 | 14 |
|---|---|---|---|---|
| $\alpha_{mín.}$ | 0,010 | 0,008 | 0,006 | 0,004 |
| Eficiência (%) | 78,57 | 72,76 | 63,80 | 42,01 |

Na Figura 6.53, encontram-se os gráficos da distribuição espacial de partículas referentes às simulações 11, 12, 13 e 14. Apesar de que entre os gráficos relativos ao caso 11 (parte a) e ao caso 12 (parte b) não há uma diferença significativa, de uma forma geral, quanto maior o fator de empacotamento, maior a concentração de partículas em posições maiores de X, ou seja, posições que representam camadas mais externas do filtro simulado. No caso da simulação 14 (parte d), nota-se que as partículas atingiram posições mais internas, sendo que nas posições mais externas (posições de X entre 27 e 36) não houve captura de partículas.

As curvas de redução de permeabilidade ao longo do tempo, para as simulações 11, 12, 13 e 14, estão apresentadas na Figura 6.54. Nota-se, claramente, que há uma maior redução de permeabilidade quanto maior for o valor de $\alpha$. Verifica-se que a menor redução é referente à simulação 14 ($\alpha_{min.} = 0,004$) e a maior redução é referente à simulação 11 ($\alpha_{mín.} = 0,010$), sendo que nos casos das simulações 12 e 13, ocorrem situações intermediárias. O que se verifica pelo gráfico da Figura 6.54, é devido, principalmente, a dois fatores: primeiro, tendo o filtro maior $\alpha$

(mais fechado), a restrição à passagem do fluido é maior; segundo, nos filtros de maior α, há maior acúmulo de partículas, implicando em maior obstrução (total ou parcial) dos poros, ou seja, aumentado a dificuldade para a passagem do fluido e, conseqüentemente, há uma maior redução de permeabilidade.

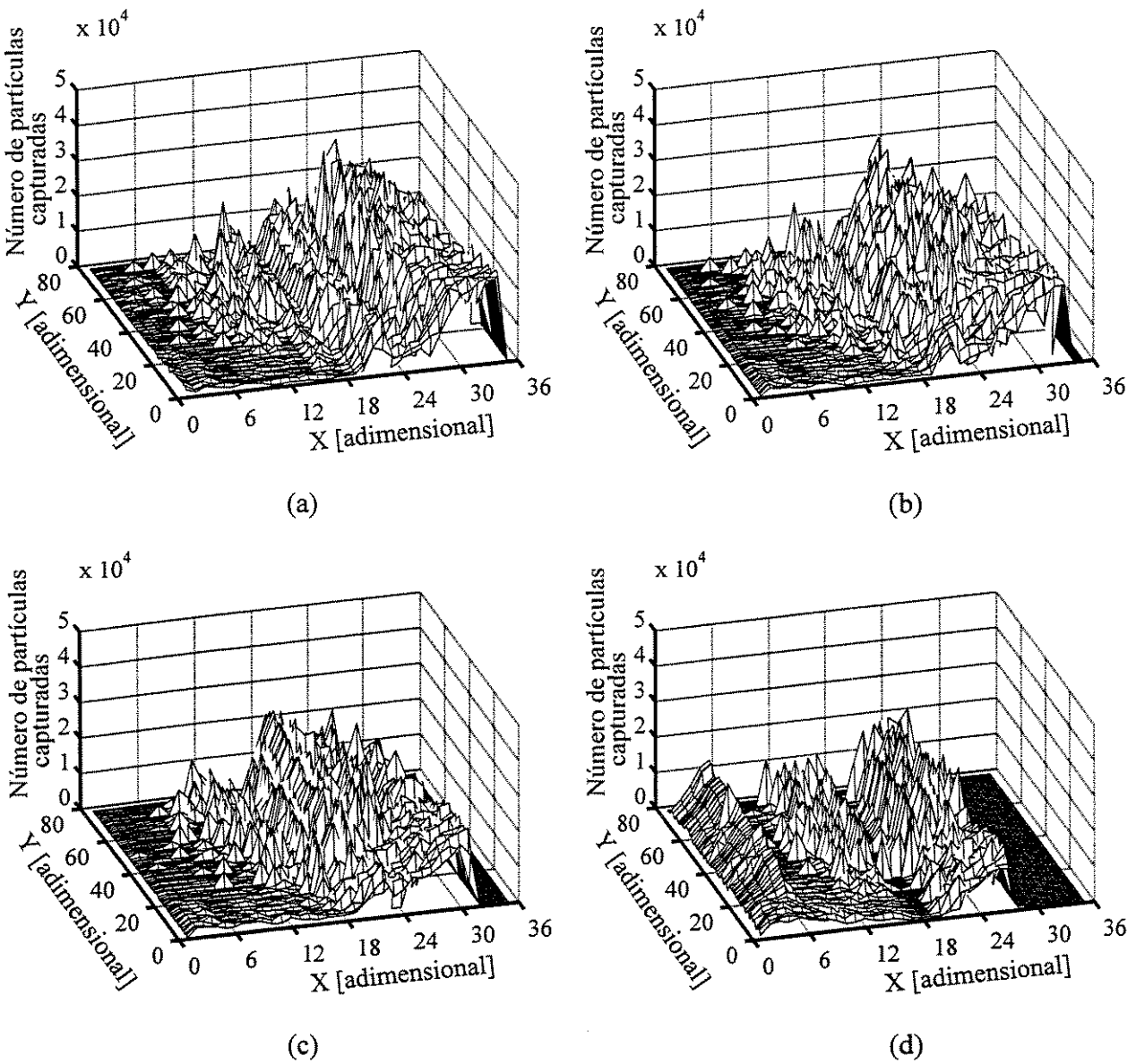



Figura 6.53 - Distribuição espacial de partículas referentes às simulações 11 (a), 12 (b), 13 (c) e 14 (d)

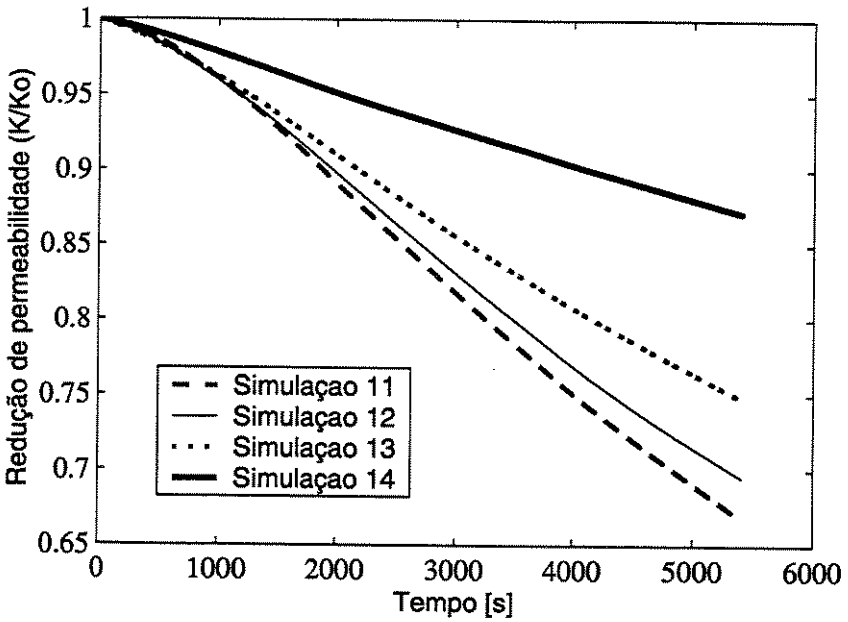



Figura 6.54 - Curvas de redução de permeabilidade para as simulações 11, 12, 13 e 14

# Capítulo 7

# Conclusões e Recomendações Para Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de técnicas de análise de elementos filtrantes e de processos de filtração, através da tomografia computadorizada de raios-X e através da simulação numérica. As conclusões a seguir destacam a aplicação da tomografia na detecção de defeitos em elementos filtrantes, na análise de processos de filtração e também os resultados obtidos com o desenvolvimento e aplicação do modelo de filtração.

*Tomografia de raios-X na detecção de defeitos em filtros*

Através da aplicação da tomografia de raios-X foi possível detectar diversos tipos de defeitos em elementos filtrantes, tal como se demonstrou por meio dos resultados com as amostras de filtros do tipo resinado e do tipo carbono ativado. Foram encontradas regiões de alta densidade em filtros adquiridos no mercado, cujo defeito não foi detectado pelo fabricante. Também foram encontrados defeitos tais como inclusões e fraturas em filtros do tipo carbono ativado.

*Tomografia de raios-X na análise de processos de filtração*

A alta diferença de atenuação entre o material que constitui os filtros analisados e o material contaminante, permitiu a obtenção de imagens tomográficas com alto contraste entre o contaminate e o material do filtro, ou seja, foi possível se detectar com clareza as regiões com presença de partículas (ou aglomerados de partículas) no interior dos filtros.

As técnicas de processamento de imagens, tais como, a segmentação estratificada e o processo de reconstrução tridimensional, possibilitaram a análise de um grande volume de imagens e foi possível modelar as regiões de acúmulo de contaminantes. A reconstrução tridimensional por regiões (interna, intermediária e externa) constituiu uma boa ferramenta de visualização espacial do contaminante no interior dos elementos.

Foi possível fazer o mapeamento interno da concentração de contaminantes, mostrando que na maioria dos casos o espaço interno do elemento não é totalmente utilizado, ou seja, existem regiões preferenciais para o acúmulo do contaminante.

O perfil de concentração do contaminate no interior dos elementos filtrantes, bem como a forma dos aglomerados, depende de vários fatores tais como tamanho das partículas, velocidade de filtração e densidade das partículas. Em geral, partículas menores tendem a ser capturadas em regiões mais internas e partículas maiores tendem a ser capturadas nas regiões mais externas, ainda que, em alguns casos, esta tendência não tenha sido verificada, como por exemplo, os casos das amostras 1 e 2. Com relação à velocidade de filtração, mostrou-se que para velocidades menores, ocorre a formação de aglomerados menores e os mesmos se distribuem de forma mais homogênea no interior do filtro, porém, a quantidade de contaminante capturada foi menor, ou seja, a eficiência global de filtração, foi menor. Para velocidades maiores, formam-se aglomerados maiores, e uma maior quantidade de partículas é retida em posições mais externas ao filtro. Com relação à densidade, mostrou-se que há uma tendência das partículas mais leves atingirem posições mais internas ao filtro.

*Desenvolvimento e aplicação do modelo de filtração*

Foi possível desenvolver um modelo de filtração através do acoplamento das equações fenomenológicas (lei de Darcy e equação da continuidade) com as equações de filtração, inserindo no modelo o efeito dinâmico do acúmulo de partículas na variação de propriedades tais como a porosidade e a permeabilidade do filtro. Várias simulações foram realizadas utilizando-se o modelo desenvolvido, e os resultados foram comparados com os resultados experimentais. Houve, principalmente, concordância qualitativa entre os resultados. Com relação ao aspecto

quantitativo, verificou-se uma maior incidência de discordâncias, quando comparado com o aspecto qualitativo. Uma das principais razões para estas discordâncias é que a estrutura de um filtro real (constituído por fibras, principalmente) é relativamente complexa, sendo difícil reproduzi-la fielmente através de um modelo matemático e/ou numérico.

Na utilização do modelo desenvolvido, verificou-se a influência de alguns parâmetros, tais como: o tamanho de partícula, diâmetro das fibras que compõem o filtro modelado, densidade das partículas e o fator de empacotamento do filtro. Os resultados obtidos com a aplicação do modelo mostraram que:

a) Como era de esperar, partículas maiores acumulam em camadas mais externas do filtro. Em geral, houve uma concordância qualitativa em relação aos casos experimentais, no que diz respeito à concentração espacial de partículas.

b) Quanto menor o diâmetro das fibras, menor é a penetração das partículas no filtro modelado. Fibras de diâmetros menores tendem a formar matrizes porosas mais compactas, ou seja, com menor porosidade, implicando na tendência das partículas serem capturadas nas camadas mais externas.

c) A densidade das partículas influencia na eficiência do processo de filtração. No caso da simulação 6 ($\rho$ = 2650 kg/m$^3$) obteve-se 53,5 % de eficiência e, no caso da simulação 10 ($\rho$ = 3950 kg/m$^3$), a eficiência foi de 70,3 %.

d) Quanto menor o fator de empacotamento ($\alpha$), menor a eficiência do processo. Considerando partículas com a mesma distribuição de diâmetros, no caso de uma menor densidade de empacotamento, as partículas tendem a atingir camadas mais internas do filtro modelado.

Uma nova aplicação para a tomografia computadorizada de raios-X, como uma ferramenta viável na análise de filtros e processos de filtração, e o desenvolvimento de um modelo de filtração, que leva em conta o efeito dinâmico do acúmulo de partículas no processo, são as principais contribuições deste trabalho. As técnicas desenvolvidas podem atuar como ferramentas de apoio no projeto e desenvolvimento de novas geometrias de filtros, bem como na otimização das existentes.

*Sugestões para trabalhos futuros*

a) Aplicar a técnica tomográfica para outros tipos de filtros, no que diz respeito à forma geométrica e ao material, como por exemplo, filtros de fibras obtidas pelo processo *melt-blown*;

b) Verificar a eficiência da técnica tomográfica para outros tipos de contaminantes, como por exemplo, contaminantes orgânicos;

c) Aplicar outras técnicas tomográficas no estudo de processos de filtração, como por exemplo, a tomografia de capacitância elétrica ou tomografia de impedância elétrica;

d) Aplicar técnicas de análise a nível mais microscópico, como por exemplo a microtomografia de raios-X, com o intuito de se estudar mais detalhadamente a interação fluido/partícula/fibra;

e) Aprofundar o estudo do efeito do fator de forma geométrica do filtro e do efeito da microestrutura (em filtros constituídos por fibras) no modelo de filtração;

f) Realizar um estudo dinâmico, usando a técnica de tomografia, com o objetivo de se verificar a correlação entre canais de fluxo e regiões preferenciais de deposição de contaminantes;

g) Investigar se o processo de secagem influencia na redistribuição do contaminante no interior das amostras.

## Capítulo 8

## Referências Bibliográficas


1) AHN, B. G. et al. "Filtration Characteristics of Fibrous Polymeric Filter Contained Magnetic Particulate Filler." *Advancing Filtration Solutions '98* in: Advances in Filtration and Separation Technology - American Filtration Society Publications pp. 1-7, vol. 12, St. Louis, Missouri, 1998.

2) ALEXANDER, H. and CHENG, D. "Darcy's flow with variable permeability: a boundary integral solution." *Water Resources Research* vol. 20, n. 7, pp. 980-984, Jul. 1984.

3) ALTMANN, J. and RIPPERGER, S. "Particle deposition and layer formation at the crossflow microfiltration." *Journal of Membrane Science* vol. 124, pp. 119-128, 1997.

4) BENIWAL, VOL. and CHASE, G. G. "Characterizing fiber orientation in filter media." *Advancing Filtration Solutions '98* in: Advances in Filtration and Separation Technology - American Filtration Society Publications pp. 8-12, vol. 12, St. Louis, Missouri, 1998.

5) BIERCK, B. R.; WELLS, S. A. and DICK, R. I. "Compressible cake filtration: monitoring cake formation and shrinkage using synchrotron X-rays." *Journal of Water Pollution Control Federation*, vol. 60, n. 5, pp. 645-650, May. 1988.

6) BOLLER, M.; KOBLER, D. and KOCH, G. "Particle separation, solids budgets and headloss development in different biofilters." *Water Science and Technology* vol. 36, n. 4, pp. 239-247, 1997.

7) BRAZ, D.; LOPES, R.T. and MOTTA, L.M.G. "Analysis of the percentage voids of test and field specimens using computerized tomography." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* A 422, pp. 942-948, 1999.

8) BROWN, R. C. and WAKE, D. "Loading filters with monodisperse aerosols: macroscopic treatment." *Journal of Aerosol Science* vol. 30, n. 2, pp. 227-234, 1999.

9) CASTIER, M.; CUÉLLAR, O.D. and TAVARES, F.W. "Monte Carlo Simulation of particle segregation." *Powder Technology* vol. 97, pp. 200-207, 1998.

10) CHEN, M. R.; HINKLEY, R. E. and KILLOUGH. J. E. "Computed tomography imaging of air sparging in porous media." *Water Resources Research* vol. 32, n.10, pp. 3013-3024, Oct. 1996.

11) CONANT, L. D. and HOGAN, B. K. "On-Site Treatment of Production Pits and Tank Bottoms." *Filtration and Separation in Oil and Gas Drilling and Production Operations* in: Advances in Filtration and Separation Technology - American Filtration Society Publications pp. 417-421, vol. 1, Houston, Texas, 1989.

12) CUMMING, I. W.; HOLDICH, R. G. and ISMAIL, B. "Prediction of deposit depth and transmembrane pressure during crossflow microfiltration." *Journal of Membrane Science* vol. 154, pp. 229-237, 1999.

13) DHANIYALA, S. and LIU, Y. H. "Numerical modeling of three-dimensional flow in filter media." *Advancing Filtration Solutions '98* in: Advances in Filtration and Separation Technology - American Filtration Society Publications pp. 248-255, vol. 12, St. Louis, Missouri, 1998.

14) GERALD, C. F. and WHEATLEY, P. O. "Applied Numerical Analysis." Addison-Wesley, 1994.

15) GIMBEL, R. and NAHRSTEDT, A. "Removal of different kinds of particles in deep bed filters consisting of permeable synthetic collectors (PSC)." *Water Science and Technology* vol. 36, n. 4, pp. 249-258, 1997.

16) HARVEY, M.A. and BRIDGER, K. "Apparatus for studying incompressible and moderately compressible cake filtration." *Filtration & Separation*. vol. 25, pp. 21-29, Jan./Feb. 1988.

17) IMDAKM, A. O. and SAHIMI, M. "Computer Simulation of particle transport processes in flow through porous media." *Chemical Engineering Science*, vol. 46, n. 8, pp. 1977-19, 1991.

18) JACOVKIS, P. M.; SAVIOLI, G. B. and BIDNER, M. S. "Mathematical modeling of flow towards an oil well." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* vol. 46, pp. 1521-1540, 1999.

19) JAPUNTICH, D. A.; STENHOUSE, J.I.T. and LIU, B.Y.H. "Effective pore diameter and monodisperse particle clogging of fibrous filters." *Journal of Aerosol Science* vol. 28, n. 1, pp. 147-158, 1997.

20) JIRARATANANOM, R.; UTTAPAP, D. and SAMPRANPIBOON, P. "Crossflow microfiltration of a colloidal suspension with the presence of macromolecules." *Journal of Membrane Science* vol. 140, pp. 57-67, 1998.

21) JOHNSTON, P. R. "Pore-size distributions in filter media with graded densities." *Filtration & Separation* vol. 36, n. 6, pp. 51-55, Jul./Aug. 1999.

22) JOURDAN, M. F. and PEUCHOT, C. "New test method for evaluation of water cartridge filters." *Filtration & Separation* vol. 31, n. 5, pp. 427-434, Jul./Aug. 1994.

23) KAMINSKI, I.; VESCAN, N. and ADIN. A. "Particle size distribution and wastewater filter performance." *Water Science and Technology* vol. 36, n. 4, pp. 217-224, 1997.

24) KANAOKA, C. and KISHIMA, T. "Observation of the process of dust accumulation on a rigid ceramic filter surface and the mechanism of cleaning dust from the filter surface." *Advanced Powder Technology* vol. 10, n. 4, pp. 417-426, 1999.

25) KANTZAS, A. "Computation of holdups in fluidized and trickle beds by computer- assisted tomography." *AIChE Journal* vol. 40, n. 7, pp. 1254-1261, Jul. 1994.

26) KANTZAS, A.; WRIGHT, I. and KALOGERAKIS, N. "Quantification of channelling in polyethylene resin fluid beds using X-Ray Computer Assisted Tomography (CAT)." *Chemical Engineering Science*. vol. 52, n. 13, pp. 2023-2035, Jul. 1997.

27) KUPERSCHMIDT, I. VOL. "Evaluation of porous filter operation efficiency" *Filtration & Separation*, vol. 30, n. 1, pp. 55-58, Jan./Feb. 1993.

28) LA HEIJ, E.J.; KERKHOF, P.J.A.M.; KOPINGA, K. and PEL, L. "Determining porosity profiles during filtration and expression of sewage sludge by NMR imaging." *AIChE Journal* vol.42, n. 4, pp. 953-959, Apr. 1996.

29) LABECKI, M.; PIRET, J. M. and BOWEN, B. D. "Two-dimensional analysis of flow in hollow-fibre modules." *Chemical Engineering Scince* vol. 50, n. 21, pp. 3369-3384, 1995.

30) LANGE, R.; FISSAN, H. and SCHMIDT-OTT, A. "Predicting the collection efficiency of agglomerates in fibrous filters." *Particle & Particle Systems Characterization* vol. 16, n. 2, pp. 60-65, Jun. 1999.

31) LANZA, M. R V; MASCHIO, C.; ARRUDA, A.C.F e BERTAZZOLI, R. "Distribução da Corrente Limite no Interior de um Eletrodo de CVR Durante a Remoção de Zinco de um Efluente Real." *Congresso de La Sociedad Iberoamericana de Eletroquimica*. Viña Del Mar. 1998.

32) LEBEDEV, M. N. and KIRSCH, A. A. " Pressure drop of loaded filters." *Journal of Aerosol Science* vol. 26, Suppl. 1, pp. S735-S736, 1995.

33) LECH, M; POLEDNIA, E. and WERSZLER, A. " Measurement of solid mean particle size using tomography." *Powder Technology* vol, 111, pp. 186-191, 2000.

34) LEE, S. L. and YANG, J. H. "Modeling of Darcy-Forchheimer drag for fluid flow across a bank of circular cylinders." *International Journal of Heat and Mass Transfer* vol. 40, n. 13, pp. 3149-3155, 1997.

35) LESSMAN, R. C.; FAGHRI, M.; KAHN, A. and ZIA, M. "A unified trajectory mapping approach to predicting particle capture." *Proceedings of the Annual Technical Conference on Filtration and Separation: Filtration - Providing the Environmental Solutions for Planet Earth* pp. 171-178, March 27-29, Pittsburgh, PA 1989.

36) LI, T. "Dependence of filtration properties on stainless steel medium structure." *Filtration and Separation* vol. 34, n. 3, pp. 265-273, April, 1997.

37) LI, Y. and PARK, C. W. "A predictive model for the removal of colloidal particles in fibrous filter media." *Chemical Engineering Science* vol. 54, pp. 633-644, 1999.

38) LU, W. M.; TUNG, K. L and HWANG, K. J. "Effect of woven structure on transient characteristics of cake filtration." *Chemical Engineering Science* vol. 52, n. 11, pp. 1743-1756, 1997.

39) LU, X.; MIAO, P. et al. "X-Ray computed tomography studies of gas storage and transport in Denovian shales." *AIChE Journal* vol. 40, n. 7, pp. 1246-1253, Jul. 1994.

40) LÜCKE, T. and FISSAN, H. "The prediction of filtration performance of high efficiency gas filter elements." *Chemical Engineering Science* vol. 51, n. 8, pp. 1199-1208, 1996.

41) LUTRAN, P. G. and DELIKAT, E. P. "Liquid distribution in Trickle beds. An experimental study using computer-assisted tomography." *Industrial and Engineering Chemistry Research* vol. 30, n. 6, pp. 1270-1280, Jun. 1991.

42) MACEDO, A.; VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; CRUVENIL, P. E. and CRESTANA, S. "X-Ray microtomography to characterize the physical properties of soil and particulate systems." *Powder Technology* vol. 101, pp. 178-182, 1999.

43) MACKIE, R.I. and BAI, R. "The role of particle size distribution in the performance and modelling of filtration." *Water Science and Technology*, vol. 27, n. 10, pp. 19-34, 1993.

44) MASCHIO, C. "Tomografia Computadorizada de Raios-x como Técnica de Ensaios Não Destrutivos de Materiais.", Dissertação (Mestrado), Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1997, 85 p.

45) MASSARANI, G.; DAMASCENO, J.J.R. and SOUZA, R. "Determination of a Concentration Profile in a Continuous Thickener Using a Gamma Ray Attenuation Technique." *Fluid/Particle Separation Journal* vol. 3, n. 4, pp.2894-2896, Dec. 1990.

46) MAUS, R. and UMHAUER, H. "Collection and adhesion efficiency of biological particles on single fibers." *Journal of Aerosol Science* vol. 27, pp. S255-S256, 1996.

47) MAUS, R. and UMHAUER, H. "Collection efficiencies of coarse and fine dust filter media for airborne biological particles." *Journal of Aerosol Science* vol. 28, n. 3, pp. 401-415, 1997.

48) MELTZER, T. H. "Filtration in the Pharmaceutical Industry." Marcel Dekker, New York, 1987.

49) NICKOLAUS, N. "What, when and why of cartridge filters." *Filtration & Separation* vol. 12, pp. 155-163, Mar./Apr. 1975.

50) OHYA, H.; KIM, J. J.; CHINEN, A. *et. al.* "Effects of pore size on separation mechanisms of microfiltration of oil water, using porous glass tubular membrane." *Journal of Membrane Science* vol. 145, pp. 1-14, 1998.

51) OHZAWA, Y; NOMURA, K. and SUGIYAMA, K. "Relation between porosity and pore size or pressure drop of fiber SiC filter prepared from carbonized cellulose-powder preforms." *Materials Science and Engineering A255*, pp. 33-38, 1998.

52) OSMAK. S.; GOSAK, D. and GLASNOVIC. A. "Dynamic mathematical model of deep bed filtration process." *Computers Chemical Engineering* vol. 21, pp. S763-S768, 1997.

53) PAYATAKES, A.C.; PARK, H. Y. and PETRIE, J. "A visual study of particle deposition and reentrainment during depth filtration of hydrosols with a polyelectrolyte." *Chemical Engineering Science* vol. 36, n. 8, pp.1319-1335, 1981.

54) PENICOT, P. et al. "Clogging of HEPA fibrous filters by solid and liquid aerosol particles: an experimental study." *Filtration & Separation* vol. 36, n. 2, pp. 59-64, Mar. 1999.

55) PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS, A. and LANGFORD, C. "3-D visualization of soil macroporosity using x-ray CAT scanning." *Canadian Agricultural Engineering* vol. 39, n. 4, pp. 249-261, Oct./Dec. 1997.

56) PEUCHOT, C. "New standard designation for process cartridge filter efficiency." *Filtration & Separation.* vol. 34, n. 3, pp. 217-222, Mar. 1997.

57) PINCHUK, L. S.; MARKOVA, L. VOL.; GROMYKO, Y. VOL. et al. "Polymeric magnetic fibrous filters." *Journal of Materials Processing Technology* vol. 55, pp. 345-350, 1995.

58) PINHEIRO, G.I.; SCHMITZ, P. and HOUI, D. "Particle capture in porous media when physico-chemical effects dominate." *Chemical Engineering Science* vol. 54, n. 17, pp. 3801-3813 Sep. 1999.

59) PODGÓSKI A.; GRADÓN, L. and GRZYBOWSK, I. "Theoretical study on deposition of flexible and stiff fibrous aerosol particles on a cylindrical collector." *The Chemical Engineering Journal* vol. 58, pp. 109-121, 1995.

60) PRASANTHI, H.; VIGNESWARAN, S. and DHARMAPPA, H. B. "Effect of particle concentration on the entire cycle of filtration." *Water Science and Technology* vol. 35, n. 8, pp. 91-102, 1997.

61) PTAK, T.J. "Particle capture mechanisms in cabin air filter media." *Advancing Filtration Solutions '98* in: Advances in Filtration and Separation Technology - American Filtration Society Publications pp. 281-287, vol. 12, St. Louis, Missouri, 1998.

62) PUTNAM, D. D. and BURNS, M. A. "Predicting the filtration of noncoagulating particles in depth filters." *Chemical Engineering Science* vol. 52, n. 1, pp. 93-105, 1997.

63) RAISTRICK, J.H. "Advantages of adsorptive filtration." *Filtration & Separation.* vol. 23, pp. 354-357, Nov./Dec. 1986.

64) RAYNOR, P.C. and LEITH, D. "The influence of accumulated liquid on fibrous filter performance." *Journal of Aerosol Science* vol. 31, n. 1, pp. 19-34, 2000.

65) RAMARAO, B. VOL. "Image analysis of particle deposit in model fibrous filters." *Proceedings of the Annual Technical Conference on Filtration and Separation: Filtration - Providing the Environmental Solutions for Planet Earth* pp. 185-211, March 27-29, Pittsburgh, PA 1989.

66) REGE, S. D. and FOGLER, H. S. "Network model for straining dominated particle entrapment in porous media." *Chemical Engineering Science* vol. 42, n. 7, pp.1553-1564, 1987.

67) RISBUD, M. "Cake filtration empirically incorporating particle migration." *Filtration & Separation* vol. 18, pp. 20-24, Jan./Feb. 1981.

68) ROTARIU, O.; REZLESCU, N.; MURARIU, VOL. and BADESCU, VOL. " The influence of slurry concentration on the theoretical filtration efficiency of a transversal high gradient magnetic filter cell with bounded flow field." *Powder Technology* vol. 96, pp. 42-47, 1998.

69) ROVERO, G. and ELIA, A. M. "Comparative efficiencies of traditional and innovative structure fibre cartridge." *Filtration and Separation* vol. 33, n. 3, pp. 251-254, Mar. 1996.

70) SANDSTEDT, H. N. and WEISENBERGER, J. J. "Cartridge filter performance and micro rating." *Filtration & Separation* vol. 22, pp. 101-105, Mar./Apr. 1985.

71) SCHAAFSMA, S. H.; VONK, P.; SEGERS, P. and KOSSEN, N.W.F. "Description of agglomerate growth." *Powder Technology* vol. 97, pp. 183-190, 1998.

72) SCHMIDT, E. "Simulation of three-dimensional dust structures via particle trajectory calculations for cake-forming filtration." *Powder Technology* vol. 86, pp. 113-117, 1996.

73) SCHWEERS, E. and LÖFFLER, F. "Realistic modelling of the behaviour of fibrous filters through consideration of filter structure." *Powder Technology* vol. 80, pp. 191-206, 1994.

74) SHAPIRO, M. "An analytical model for aerosol filtration by nonuniform filter media." *Journal of Aerosol Science* vol. 27, n. 2, pp. 263-280, 1996.

75) SHUCOSKY, A. C. "Select the right cartridge filter." *Chemical Engineering*, vol. 18, pp. 72-77, Jan. 1988.

76) SOLT, G.S. "Depth filtration assisted by electrical fields." *Water Science and Technology*, vol. 27, n. 10, pp. 95-99, 1993.

77) STAMATAKIS, K. and TIEN, C. "A simple model of cross-flow filtration based on particle adhesion." *AIChE Journal* vol. 39, n. 8, pp. 1292-1302, Aug. 1993.

78) STAMATAKIS, K. "Cake formation and growth in cake filtration." *Chemical Engineering Science*, vol. 46, n. 8, p. 1917, 1991.

79) TARLETON, E.S. and HANCOCK, D. L. "Imaging of filter cakes through Electrical Impedance Tomography." *Filtration & Separation.* vol. 33, n. 6, pp. 491-494, Jun. 1996.

80) TARLETON, E.S. "Predicting the performance of pressure filters." *Filtration & Separation* vol. 35, n. 3, pp. 293-298, Apr. 1998.

81) THOMAS, D.; CONTAL, P.; RENAUDIN, V; *et al.* "Modelling pressure drop in HEPA filters during dynamic filtration." *Journal of Aerosol Science* vol. 30, pp. 235-246, 1999.

82) TIEHM, A.; HERWIG, VOL. and NEIS, U. "Particle size analysis for improved sedimentation and filtration in waste water treatment." *Water Science and Technology* vol. 39, n. 8, pp. 99-106, 1999.

83) TILLER, F.M.; KIRBY, J.M. and NGUYEN, H. L. "Approximate theory for radial filtration/consolidation." *Journal of Geotechnical Engineering* - ASCE, vol. 122, n. 10, 797-805, Oct. 1996.

84) TILLER, F. M. and HSYUNG, N. B. "Unifying the theory of thickening, filtration and centrifugation." *Water Science and Technology*, vol. 28, n. 1, pp. 1-9, 1993.

85) TILLER, F.; HSYUNG, N. B. and SHEN, Y. "CATSCAN data in the analysis of sedimentation in constant pressure filtration." *Proceedings of the Annual Technical Conference on Filtration and Separation: Filtration - Providing the Environmental Solutions for Planet Earth* pp. 245-249, March 27-29, Pittsburgh, PA 1989.

86) TOBIASON, J. E. and VIGNESWARAN, B. "Evaluation of a modified model for deep bed filtration." *Water Research* vol. 28, n. 2, pp. 335-342, 1994.

87) TOYE, D.; MARCHOT, P. and L'HOMME, G. "The use of large scale Computer Assisted Tomography for the study of hydrodynamics in trickling filters." *Chemical Engineering Science*. vol. 49, n. 24B, pp. 5271-5280, Dec. 1994.

88) TOYE, D.; MARCHOT, P., CRINE, M. and L'HOMME, G. "Analysis of liquid flow distribution in trickling flow reactor using Computer-Assisted X-Ray Tomography." *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 73 (A3), pp. 258-262, Apr. 1995.

89) TOYE, D.; MARCHOT, P.; CRINE, M. and L'HOMME, G. "Modelling of multiphase flow in packed beds by computer-assisted x-ray tomography." *Measurement Science and Technology*, vol. 7, n. 3, pp. 436-443, Mar. 1996.

90) TOYE, D.; MARCHOT, P.; CRINE, M.; PELSSER, A. M. and L'HOMME, G. "Local measurements of void fraction and liquid holdup in packed columns using X-ray computed tomography." *Chemical Engineering and Processing* vol. 37, n. 6, pp. 511-520, Novol. 1998.

91) TOLLNER, E.W.; MELEAR, N.D.; RODRIGUEZ, L. A. and WRIGHT, M.E. "Soil aggregate size distributions using X-ray images." *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, vol. 41, n. 4, pp. 1207-1215, Jul./Ago. 1998.

92) TREFFRY-GOATLEY, K. "The application of nanofiltration membranes to the treatment of industrial effluent and process streams." *Filtration & Separation*, vol. 30, n. 1, pp. 63-66, Jan./Feb. 1993.

93) VAFAI, K. and KIM, S. J. "On the limitations of the Brinkman-Forchheimer-extended Darcy equation." *International Journal of Heat and Fluid Flow* vol. 16, n. 1, pp. 11-15, Feb. 1995.

94) VENGIMALLA, R.; CHASE, C. G. and RAMARAO, B. VOL. "Modeling of filler retention in compressible fibrous media." *Separation and Purification Technology* vol. 15, pp. 153-161, 1999.

95) VERDEGAN, B.M. et al. "Preferential attachment of contaminants to filter media in oil." *Filtration & Separation*, vol. 34, n. 10, pp. 1061-1064, Dec. 1997.

96) VIGNESWARAN, B. and TULACHAN, R. K. "Mathematical modelling of transient behaviour of deep bed filtration." *Water Research* vol. 22, n. 9, pp. 1093-1100, 1988.

97) WALSH, D. C. and STENHOUSE, J. I. T. "The effect of particle size, charge, and composition on the loading characteristics of an electrically active fibrous filter material." *Journal of Aerosol Science* vol. 28, n. 2, pp. 307-321, 1997-a.

98) WALSH, D. C. and STENHOUSE, J. I. T. "Clogging of an electrically active fibrous filter material: experimental results and two-dimensional simulations." *Powder Technology*, vol. 93, pp. 63-75, 1997-b.

99) WALSH, D. C. "Recent Advances in the understanding of fibrous filter behaviour under solid particle load." *Filtration & Separation* vol. 33, n. 6, pp. 501-506, Jun. 1996.

100) WANG, S.; DYAKOWSKI, T.; GELDART, D. and BECK, M. "Application of electrical capacitance tomography to flow modelling within a circulating fluidized bed." *Particle & Particle Systems Characterization*. vol. 15, n. 1, pp. 51-55, Feb. 1998.

101) WANG, W.; JIA, X. and DAVIES, G. A. "A theoretical study of transient cross-flow filtration using force balance analysis." *The Chemical Engineering Journal* vol. 60, pp. 55-62, 1995.

102) WELLINGTON, S. L. and VINEGAR, H. J. "X-Ray computerized tomography." *Journal of Petroleum Technology* vol. 39, n. 8, pp. 885-898, Aug. 1987.

103) WELLS, S. A. and DICK, R. I. "Synchrotron radiation measurements of degree of saturation in porous matrix." *Journal of Engineering Mechanics* vol. 118, n. 8, pp.1738-1744, Aug. 1992.

104) WILLIAMS, C. J. "Testing the performance of spool-wound cartridge filters. " *Filtration & Separation* vol. 29, 162-168, Mar./Apr. 1992.

105) WILLIAMS, C. J. and EDYVEAN, R.G.J. "Testing cartridge filters in aqueous media: Interpreting the results - The pitfalls and problems. Part 1: Evaluating performance methods." *Filtration & Separation* vol. 32, n. 2, pp. 157-161, Feb. 1995-a.

106) WILLIAMS, C. J. and EDYVEAN, R.G.J. "Testing cartridge filters in aqueous media: Interpreting the results - The pitfalls and problems. Part 2: The problems and pitfalls of cartridge filter performance evaluation". *Filtration & Separation* vol. 32, n. 3, pp. 255-259, Mar. 1995-b.

107) ZARUTSKAYA, T. and SHAPIRO, M. "Capture of nanoparticles by magnetic filters." *Journal of Aerosol Science* vol. 31, pp. 907-921, 2000.

108) ZHU, C.; LIN, C.H. and CHEUNG, C. S. "Inertial impaction-dominated fibrous filtration with rectangular or cylindrical fibers." *Powder Technology* vol. 112, pp. 149-162, 2000.

## *Anexo A - Publicações Resultantes desta Tese*

### 1 Revistas Internacionais Indexadas (Publicados/aceitos*)

[1.1] MASCHIO, C. and ARRUDA, A. C. F. **"Using X-Ray Computerized Tomography for Characterization of Defects in Cartridge Filters."**
*Journal of Testing and Evaluation* vol. 30, no. 1 (ASTM) Jan. **2002**. (4 pg.)
*(paper aceito para publicação em julho/2001).

[1.2] MASCHIO, C. and ARRUDA, A. C. F. **"Modelling of the Efficiency of Fibrous Filters Through Numerical Simulation and X-Ray Tomography."**
*Advanced Powder Technology* (VSP Publishers and Society of Powder Technology in Japan) vol. 12, no. 3, pp. 311-329, Aug./Sep., **2001**.

[1.3] MASCHIO, C. and ARRUDA, A. C. F. **"Application of X-Ray Computerized Tomography to Characterize Particle Retention Within Depth Filters."**
*Particle & Particle Systems Characterization* (Wiley-Vch Publishers)
vol. 17, no. 1, pp. 28-32, Mar. **2000**.

[1.4] MASCHIO, C. and ARRUDA, A. C. F. **"Analysis of Contaminant Distribution in Filter Cartridges Using X-Ray Computerized Tomography."**
*Filtration and Separation* (Elsevier Science Technology Publishers)
vol. 36, no. 5, pp. 51-56, Jun. **1999**.

### 2 Congresso Nacional

[2.1] MASCHIO, C. and ARRUDA, A. C. F. **"Caracterização de Filtros e Processos de Filtração Usando-se Tomografia Computadorizada de Raios-X."** In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1999. Águas de Lindóia, Nov. **1999**.