

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM UM FILTRO  
GRANULAR EM ESCALA BANCADA PARA  
REMOÇÃO DE PARTICULADOS ORIUNDOS DA  
GASEIFICAÇÃO/COMBUSTÃO DE CARVÕES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Letícia Xavier Corbini

Porto Alegre, RS

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DA PERDA DE CARGA EM UM FILTRO  
GRANULAR EM ESCALA BANCADA PARA  
REMOÇÃO DE PARTICULADOS ORIUNDOS DA  
GASEIFICAÇÃO/COMBUSTÃO DE CARVÕES**

Letícia Xavier Corbini

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Área de concentração: Operações Unitárias

**Orientador:**

**Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio**

**Porto Alegre, RS**

**2012**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Avaliação da Perda de carga em um Filtro Granular em Escala Bancada para Remoção de Particulados Oriundos da Gaseificação/ Combustão de Carvões*, elaborada por Leticia Xavier Corbini, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Pedro Juarez Melo - Unipampa

---

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider - PROMEC/UFRGS

---

Prof. Dr. Nilo Sérgio Medeiros Cardozo - PPGEQ/UFRGS

# Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, em especial ao meu orientador Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio, pelo incentivo e confiança durante a realização deste trabalho.

Ao CNPq, através da Rede Carvão (Rede de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação do Carvão Mineral) pelo apoio financeiro.

Aos Bolsistas, Henrique Menegolla e Lucas Pereira Cavalcanti, que trabalharam em conjunto no desenvolvimento da etapa experimental deste trabalho.

Aos Colegas, M.Sc. Eng. Bruno München Wenzel e M.Sc. Eng. Cleiton Bittencourt Porciúncula, pelo auxílio nas etapas experimental e computacional respectivamente.

Aos professores parceiros da Rede Carvão: René Rech, Celso Brisolara Martins, Paulo Smith Schneider, Luiz Elody Sobreiro e Marcelo Godinho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório LETA (Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos), em especial ao Funcionário João Batista da Rosa, pelo auxílio na montagem e realização dos experimentos.

Aos colegas e amigos do Departamento de Engenharia Química, pela amizade e momentos de descontração.

Em especial à minha mãe que sempre acreditou no meu potencial e me incentivou a alcançar este objetivo. E ao Eduardo André Luges, pela compreensão, companheirismo e apoio e paciência durante estes anos.

# Resumo

A retenção de particulados oriundos da combustão apresenta-se como um dos maiores problemas em sistemas de geração de energia a partir de carvão (IGCC), e tem como principais objetivos evitar incrustações e minimizar as emissões de poluentes atmosféricos. Para a remoção destes gases e particulados tem se mostrado conveniente a utilização de tecnologias de remoção que não utilizem água como veículo, o que reduziria o impacto ambiental e os custos para o tratamento dos efluentes gerados. Dentro destas características se enquadram os filtros granulares de leito fixo ou móvel. A proposta deste trabalho consiste no estudo de um filtro granular de leito fixo inicialmente em escala de bancada para futura remoção de material particulado seco oriundo da queima do carvão. Primeiramente foi feito um estudo do modelo do filtro utilizando o simulador comercial ANSYS CFX 11.0, como ferramenta computacional. Neste estudo foi possível verificar a perda de carga do leito, a velocidade do gás na entrada do leito, linhas de corrente do gás e pontos de turbulência e recirculação anterior à experimentação. A partir destes resultados preliminares foi possível a continuação do trabalho experimental que se deu em 3 etapas. A primeira foi o cálculo do perfil de velocidade do gás, a segunda a calibração da placa de orifício, instrumento de medida de velocidade e, por fim, as medias de perda de carga por diferença de pressão. Com os dados coletados calculou-se a permeabilidade hidráulica do leito, valor este aplicado ao modelo computacional para comparação com a permeabilidade teórica. Os resultados finais de perda de carga para o filtro, principal objetivo do trabalho, estão dentro do esperado e torna possível a continuidade do projeto para estudos futuros.

# Abstract

*The particulate retention from combustion is presented with one of the biggest problems in systems of power generation from coal (IGCC), and has as main objectives to avoid fouling and minimize emissions of air pollutants. For the removal of these gases and particles has been shown convenient to use removal technologies that do not use water as a vehicle, which would reduce the environmental impact and costs for the treatment of effluents. In these characteristics are framed the fixed bed granular filter or moving bed granular filter. The purpose of this work is to study a fixed-bed granular filter initially in bench scale, for future removal of dry particulate material derived from burning coal. First a study was made of the filter model using the commercial simulator ANSYS CFX 11.0 as a computational tool. In this study it was possible to verify the pressure drop of the bed, the gas velocity at the entrance of the bed, current lines and gas recirculation and turbulence points before the experimentation. From these preliminary findings, it was possible to further experimental work was made in three steps. The first was the calculation of the velocity profile of the gas, the second orifice plate calibration, the measuring instrument speed, and finally the medium pressure drop by the pressure difference. With the collected data used to calculate the hydraulic permeability of the bed, a value applied to the computational model for comparison with theoretical permeability. The final results of loss for the filter, the main objective of this study are as expected and makes possible the continuation of the project for future studies.*

# Sumário

Sumário.....	vii
Lista de Figuras .....	x
Lista de Tabelas.....	xii
Lista de Símbolos .....	xiii
Capítulo 1.....	1
Introdução.....	1
Capítulo 2.....	4
Revisão Bibliográfica .....	4
2.1 Carvão Mineral e Energia .....	4
2.1.1 Reservas, Produção e Consumo de Carvão .....	5
2.1.2 Geração de Energia Elétrica no Brasil e no Mundo.....	5
2.1.3 Geração de energia elétrica a partir do carvão no Brasil.....	6
2.2 Tecnologias de Gaseificação e Limpeza de Gases.....	8
2.2.1 Combustão Pulverizada.....	8
2.2.2 Combustão em Leito Fluidizado .....	10
2.2.3 Gaseificação Integrada e Ciclo Combinado (IGCC) .....	11
2.2.4 Remoção Mecânica das Partículas Oriundas da Gaseificação/ Combustão do Carvão .....	13
2.3 Filtração de Gases- Principais Conceitos .....	17
2.3.1 <i>Filtros de Manga</i> .....	19
2.3.2 <i>Filtros Cerâmicos</i> .....	20
2.3.3 <i>Filtros de Vela (Candle Filters)</i> .....	20
2.3.4 <i>Filtros Granulares</i> .....	21
2.4 Escoamento através de leitos compactos.....	24
2.4.1 Cálculo da Perda de Carga em um Filtro Granular.....	25
2.4.2 Determinação dos Parâmetros Estruturais - Permeabilidade.....	26
Capítulo 3.....	29
Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) - Metodologia Matemática .....	29

3.1	Utilização do Método Computacional.....	29
3.2	Métodos Numéricos de Discretização.....	31
3.3	Níveis de Formulação dos Modelos.....	32
3.4	Metodologia CFD .....	35
3.4.1	Pré-processamento.....	35
3.4.2	Solução Numérica .....	36
3.4.3	Pós-processamento .....	36
3.5	Consistência, Estabilidade e Convergência.....	37
3.6	Construção da Malha.....	38
3.7	Turbulência .....	40
3.7.1	Escalas de turbulência.....	40
3.7.2	Modelos de Turbulência .....	42
3.8	Aplicações de CFD em Processos de Filtração de Gases .....	48
Capítulo 4.....		51
Apresentação do Problema .....		51
4.1	Geometria do Problema.....	51
4.2	Especificações do Problema.....	54
4.2.1	Condições de Contorno Aplicadas ao Problema .....	55
4.3	Teste de Malha .....	57
Capítulo 5	Procedimento Experimental .....	60
5.1	Aparato Experimental.....	60
5.2	Materiais e Métodos.....	62
5.2.1	Medida do perfil de velocidade média e da vazão experimental na saída do filtro.....	62
5.2.2	Calibração da placa de orifício - obtenção do coeficiente de descarga experimental e vazão predita .....	65
5.2.3	Medida de perda de carga no filtro .....	67
5.2.4	Obtenção da permeabilidade hidráulica experimental .....	69
Capítulo 6.....		70
Resultados e Discussão .....		70
6.1	Resultados Experimentais .....	70
6.1.1	Velocidade média de ar e Vazão.....	70
6.1.2	Perda de Carga Experimental no Filtro.....	72
6.1.3	Permeabilidade Hidráulica .....	73
6.2	Resultados Computacionais .....	74
6.2.1	Perda de Carga do Filtro.....	74

6.2.2	Perfil de pressão ao longo do filtro .....	79
6.2.3	Linhas de Corrente e variação da velocidade.....	81
Capítulo 7	.....	85
Conclusão e sugestões para trabalhos futuros.....		85
Sugestões para trabalhos futuros .....		86
Referências Bibliográficas .....		87
Apêndice A Tecnologias Limpas na geração de energia a partir do carvão.....		93
Apêndice B.....		101
a) Determinação dos pontos de tomada de velocidade no duto .....		101
e) Velocidade do gás na saída do duto.....		102
c) Vazão Experimental do Gás .....		104
Apêndice C .....		105
Apêndice D .....		112

# Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Matriz energética brasileira em capacidade instalada por fontes de geração (ANEEL, 2010).....	6
<b>Figura 2.2:</b> Modelo representativo de uma usina termelétrica a carvão pulverizado (PC) (WCI, 2005).....	9
<b>Figura 2.3:</b> Representação de uma planta que utiliza sistema IGCC à carvão (FLOWERVE, 2009).....	12
<b>Figura 2. 4:</b> Mecanismos de filtração: (a) Filtro de Torta; (b) Filtro de Clarificação e (c) Filtro de Fluxo Tangencial (SUTHERLAND, 2008).....	18
<b>Figura 2.5:</b> Mecanismo da coleta de partículas junto ao meio filtrante (SUTHERLAND, 2008).....	19
<b>Figura 2.6:</b> Desenho esquemático das peças corretoras usadas por (a) CHOU e CHEN (2007) e (b) HSIAU <i>et al.</i> (2004).....	23
<b>Figura 3. 1:</b> Fluxograma representativo das etapas para resolução de problemas usando CFD (SHAW,1992). ....	37
<b>FIGURA 4. 1:</b> SISTEMA COMPLETO: FILTRO, TUBULAÇÕES E VENTILADOR (PATENTE PROF. CELSO MARTINS). ....	52
<b>Figura 4. 2:</b> Detalhe interno do filtro estudado e calhas que retêm o meio filtrante.....	52
<b>Figura 4. 3:</b> Vista lateral do filtro já com o recheio.....	53
<b>Figura 4. 4:</b> Vista lateral do filtro e suas tubulações a jusante a montante.....	53
<b>Figura 4. 5:</b> Malha do filtro em detalhe. ....	58
<b>Figura 4. 6:</b> Esquema representativo do procedimento realizado. ....	59
<b>Figura 5. 1:</b> Filtro em escala de bancada.....	60
<b>Figura 5. 2:</b> Leito completo com as esferas de vidro (a); preenchimento completo até o bocal de alimentação (b).....	61
<b>Figura 5. 3:</b> Detalhe do ventilador (a) conectado ao sistema e do inversor de frequências (b) à frente.....	62
<b>Figura 5. 4:</b> Detalhe do duto extensor colocado após o ventilador para as medidas de velocidade.....	63

<b>Figura 5. 5:</b> Placa de orifício conectada ao sistema. Em detalhe os pontos de tomada de pressão de canto (a) conectados entre si e ao manômetro digital (b).....	67
<b>Figura 5. 6:</b> Localização dos pontos de tomadas de pressão na linha, antes (a) e após (b) o filtro, em detalhe. ....	68
<b>Figura 6. 1:</b> Gráfico de $\Delta P$ versus vazão real do gás para todos os testes realizados no filtro. ....	73
<b>Figura 6. 2:</b> Gráfico de perda de carga versus velocidade superficial para obtenção da permeabilidade hidráulica. ....	74
<b>Figura 6. 3:</b> Gráfico de $\Delta P$ versus vazão real. ....	76
<b>Figura 6. 4:</b> Gráfico comparativo para perda de carga entre os dados teóricos e os práticos. ....	78
<b>Figura 6. 5:</b> Perfil de pressão através das tubulações e do filtro. ....	80
<b>Figura 6. 6:</b> Detalhe do perfil de pressão no leito (local que apresenta maior perda de carga).....	80
<b>Figura 6. 8:</b> Variação da velocidade em um plano localizado no interior do filtro a 290 mm da entrada.....	83
<b>Figura 6. 9:</b> Distribuição da energia cinética turbulenta através do filtro.....	84
<b>Figura B. 2:</b> Esquema representativo da posição dos pontos de tomada de velocidade no duto. ....	102
<b>Figura C. 1:</b> Gráfico de Vazão Experimental (real) versus Vazão Teórica para obtenção de $C_d$ . ....	108
<b>Figura C. 2:</b> Gráfico da curva de calibração da placa de orifício e dados comparativos dos valores de $C_d$ da Tabela ASME para uma placa com $\beta_d=0,26$ ; $D=275$ mm e tomadas de pressão de canto. ....	109
<b>Figura C. 3:</b> Representação dos resultados médios das vazões para cada frequência de trabalho. ....	111
<b>Figura D. 1 :</b> Planilha para coleta de dados para os experimentos do filtro. ....	112

# Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Usinas termelétricas em operação e potências instaladas (ANEEL, 2009). .....	7
<b>Tabela 3. 1:</b> Níveis de formulação de modelos (MALISKA, 2004). .....	33
<b>Tabela 3. 2:</b> Classificação dos modelos de turbulência (ANSYS® CFX 11.0). .....	43
<b>Tabela 4. 1:</b> Detalhe das malhas testadas. ....	57
<b>Tabela 6. 1:</b> Valores de velocidade no duto ( $u_{duto}$ ) em cada teste e média para cada frequência de trabalho no ventilador. ....	71
<b>Tabela 6. 2:</b> Valores de velocidade do gás ( $m.s^{-1}$ ) antes do filtro ( $u_{filtro}$ ) obtidos a partir da média da velocidade do gás no duto ( $u_{duto}$ ). ....	71
<b>Tabela 6. 3:</b> Valores de perda de carga para cada teste realizado no filtro. ....	72
<b>Tabela 6. 4:</b> Resultados computacionais e experimentais de perda de carga no filtro. ....	75
<b>Tabela C. 1:</b> Valores de vazão teórica, real experimental e os coeficientes de descarga teórico e experimental. ....	107
<b>Tabela C. 2:</b> Média dos valores de vazão experimental e teórica, valores do coeficiente de descarga obtido pela Equação (C.4) e números de Reynolds para o intervalo de trabalho. ....	108
<b>Tabela C. 3:</b> Valores e resultados das vazões para cada teste. ....	110
<b>Tabela C. 4:</b> Valores médios das vazões. ....	111

# Lista de Símbolos

$A$	área de filtração, $m^2$
$A_p$	área transversal da partícula, $m^2$
$C_D$	coeficiente de arraste, adimensional
$C_i$	concentração do componente $i$ , $kg.m^{-3}$
$C_p$	Capacidade calorífica, $J/K$
$D$	difusividade, $m^2.s^{-1}$
$d_p$	diâmetro médio das partículas, $m$
$g$	aceleração da gravidade, $m.s^{-2}$
$g_c$	fator de proporcionalidade
$k_T$	energia cinética turbulenta, $m^2.s^2$
$k$	permeabilidade hidráulica, $m^2$
$L$	espessura da camada de leito, $m$
$l_d$	escala de comprimento
$m_p$	massa da partícula, $kg$
$N$	número de graus de liberdade
$P$	pressão, $Pa$
$P_k$	produção turbulenta, $kg.m^{-1}.s^{-3}$

S	geração de quantidade de movimento, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}$
t	tempo, s
T	temperatura, k
$u_i, u_j$	velocidade, $\text{m.s}^{-1}$
$u_s$	velocidade superficial do fluido no meio poroso, $\text{m.s}^{-1}$
U	velocidade da corrente livre, $\text{m.s}^{-1}$
$x_i, x_j$	dimensão de comprimento, m

## Letras Gregas

$\beta$	fator de forma, adimensional
$\Delta P$	perda de carga no meio poroso, Pa
$\varepsilon$	porosidade do meio, adimensional
$\mu$	viscosidade do fluido, Pa.s
$\mu_T$	viscosidade turbulenta, Pa.s
$\rho$	massa específica do fluido, $\text{kg.m}^{-3}$
$\tau$	escala de tempo, s
$v$	escala de velocidade, $\text{m.s}^{-1}$
$\nu$	viscosidade cinemática, $\text{m.s}^{-2}$

## Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil).
ASME	American Society of Mechanical Engineers.

ASU	Unidade de separação de ar ( <i>Air Separation Unit</i> ).
BFBC	Sistemas de Combustão em Leito Fluidizado a Pressão Atmosférica ( <i>Bulbling Fluidized Bed Combustion</i> ).
BP	<i>British Petroleum</i> , (Empresa Inglesa de Petróleo).
CCL	Clean Coal Technologies (tecnologias limpas de processamento do carvão mineral).
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
CFBC	Sistema de Combustão em Leito Fluidizado Circulante.
CFD	Computational Fluid Dynamics (Fluidodinâmica computacional).
CGTEE	Empresa geradora de Energia Elétrica do Sul do Brasil.
CIAB	Coal Industry Advisory Board.
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente.
COP	Conferência das Partes.
COPEL	Companhia Paranaense de Energia.
CP	Combustão Pulverizada.
CQNUMC	Convenção-Quadro das nações Unidas sobre a Mudança Climática
DPF	Particulados oriundos da queima do Diesel ( <i>Diesel Fuel Particulate</i> ).
ECBM	Maior recuperação de metano da camada de carvão.
EOR	Recuperação avançada de petróleo.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
EU	União Européia.
EUA	Estados Unidos da América.
FBC	Sistema de Combustão em Leito Fluidizado ( <i>Fluidized bed Combustion</i> ).

FEPAM	Fundação Estadual de Proteção Ambiental.	
FGD	Sistema de dessulfuração dos gases de combustão.	
GEE	Gases de efeito estufa.	
Gt	Gigatoneladas.	
Hz	Hertz.	
IEA	Agência Internacional de Energia (Agência autônoma suportada pelos países desenvolvidos que compõe a OECD, com sede em Paris).	26
IGCC	Sistema Integrado de Gaseificação e Ciclo Combinado (Integrated Gasification Combined Cycle System).	
kW	kilowatt - Unidade de potência de energia elétrica( $10^3$ Watt).	
LES	Simulação em Grandes Escalas ( <i>Large Eddy Simulation</i> ).	
LETA	Laboratório de Ensaio Aerodinâmicos.	
MDF	Método de Diferenças Finitas.	
MEF	Método de Elementos Finitos.	
MME	Ministério das Minas e Energia (Brasil).	
MVF	Método de Volumes Finitos.	
MW	Megawatt.	
MWh	Megawatt-hora	
NBR	Norma Brasileira (ABNT)	
NETL	National Energy Technology Laboratory.	
NGCC	Sistema de combustão à gás natural em ciclo combinado.	
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development	
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento.	

P&D	Pesquisa e desenvolvimento.
PFBC	Sistema de Combustão em Leito Fluidizado Pressurizado
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloroeteno ( <i>Polyvinylchloride</i> ).
RCS	Redução catalítica seletiva.
RNCS	Redução não-catalítica seletiva.
RS	Rio Grande do Sul.
SC	Santa Catarina
SND	Simulação Numérica Direta
SSE	Secretaria de Energia Elétrica (Brasil).
SST	Transporte de tensão de cisalhamento.
TWh	Terawatts-hora.
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
WCI	World Coal Institute.



# Capítulo 1

## Introdução

O Brasil possui reservas significativas de carvão mineral, e apesar disso, este combustível representa uma pequena parcela da demanda total de energia no País (ANEEL, 2010). Esta baixa participação na matriz energética do país se deve às características do carvão presente no solo brasileiro, como o baixo poder calorífico, elevado teor de cinzas e alto teor de enxofre. Apesar destas desvantagens, existem tecnologias promissoras para a geração de energia a partir do carvão, entre elas destaca-se o sistema integrado de gaseificação e ciclo combinado (Integrated Gasification Combined Cycle System - IGCC). Neste ciclo ocorre inicialmente a gaseificação do carvão e, posteriormente, a combustão dos gases em uma turbina. A produção de energia através do IGCC prescinde da remoção do material particulado e dos gases ácidos em regiões de alta temperatura. A remoção a seco desses poluentes tem a vantagem de não utilizar a água como veículo, minimizando assim custos de tratamento de efluentes e reduzindo o impacto ambiental.

Sistemas de geração de energia utilizados em termelétricas à carvão, como o IGCC, requerem uma remoção eficiente de partículas finas oriundas da queima do combustível a altas temperaturas. A remoção destas partículas é um ponto crítico deste sistema, pois além de proteger de incrustações e da erosão à jusante do trocador de calor e componentes da turbina a gás, vai também ao encontro às exigências ambientais.

Para atender esta demanda, existem diversas técnicas para remoção de partículas em escoamento de gases à altas temperaturas, como ciclones, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos, etc. Contudo, os filtros granulares se mostram mais atrativos frente às demais técnicas, devido ao baixo custo de operação e construção, confiabilidade em operação a altas temperaturas e com potencial para remoção simultânea de sólidos e contaminantes (YANG e ZHOU, 2007).

O princípio básico da filtração granular é a remoção de partículas suspensas de um

fluxo gás-sólido que passa através do meio filtrante composto pelo material granular. As partículas do fluxo ficam retidas sobre a superfície externa dos grânulos devido à interceptação mecânica ou outros fatores como inércia, gravidade, resistência, difusão, etc. O leito granular pode ser inerte ou quimicamente ativo, o qual é utilizado para remoção de componentes gasosos (como por exemplo, os gases ácidos).

A maioria dos estudos experimentais em filtros granulares tem como objetivo o estudo de perda de carga e formação da torta como o realizado por Yang e Zhou (2007) e Stanghelleet al. (2007), que visam a limpeza de gases à altas temperaturas.

Parâmetros como o tamanho dos grânulos, velocidade relativa do gás e distribuição da velocidade do gás na entrada do leito, são limitantes para a eficiência de filtração. Por este motivo, diversas pesquisas versam sobre estes aspectos especificamente, como no caso de HSU e HSIAU (2010).

Diferentemente da operação em leito fixo, na operação em leito móvel, o meio filtrante escoia através do filtro verticalmente e é removido no fundo do mesmo, enquanto o fluido (gás) passa horizontalmente através do leito. O fluxo do leito deve ser mantido constante e uniforme, sem zonas estagnadas. Estas zonas são um problema neste tipo de filtração, pois elas causam um aumento da queda de pressão no filtro com o tempo. Para corrigir este problema, muitos estudos tem se mostrado eficientes, testando um novo design para as paredes e venezianas (HSIAU *et al.*, 2008) ou até a utilização de peças corretoras no interior da zona do leito (CHOU e CHEN, 2007).

Além dos estudos experimentais, a simulação computacional também é uma importante fonte de pesquisa e tem, como suas principais aplicações nesta área a investigação da influência da velocidade de filtração (TANTHAPANICHAKOON *et al.*, 2008; LI *et al.*, 2007), a máxima queda de pressão no leito (DITTLER e KASPER, 1999) e a regeneração de meios reativos (DEUSCHLE *et al.*, 2008).

O principal objetivo desse trabalho é avaliar a queda de pressão dentro de um filtro de leito fixo granular, sem a injeção de particulados, para avaliar a futura aplicabilidade deste modelo em escala industrial. Para fazer esta análise foi utilizada a ferramenta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) na simulação numérica deste processo, com o emprego do simulador comercial ANSYS® CFX 11.0. Para a validação destes resultados foram realizados experimentos em escala de bancada. Além da perda de carga, foi calculada a permeabilidade experimental do leito e comparada à obtida matematicamente.

Desta forma, o presente trabalho está estruturado da seguinte maneira:

- Capítulo 1: Introdução ao tema pesquisando;
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica e contextualização sobre o carvão mineral, sua produção e consumo, com enfoque na geração de energia e nas tecnologias para controle de emissões, tais como a filtração;
- Capítulo 3: Fundamentação sobre a ferramenta CFD, envolvendo a modelagem empregada, técnicas numéricas, geração de malha, conceitos de turbulência e aplicações da ferramenta em processos de filtração;
- Capítulo 4: Apresentação do problema estudado analisando a geometria, condições de contorno e de entrada e o estudo de malha utilizada na simulação;
- Capítulo 5: Procedimento experimental com detalhamento das etapas experimentais realizadas no filtro em escala de bancada;
- Capítulo 6: Apresentação e discussão dos resultados obtidos nas simulações e nos experimentos para o filtro em estudo;
- Capítulo 7: Conclusões dos resultados obtidos no presente trabalho de dissertação.

# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

*Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o carvão mineral, sua produção, consumo e com um enfoque direcionado à geração de energia a partir do carvão abordando as tecnologias utilizadas e a preocupação atual com as emissões de poluentes. Além disso, serão discutidos os fundamentos teóricos sobre a retenção de particulado, com ênfase na filtração de gases, tipos de filtros e os estudos recentes sobre este assunto.*

### 2.1 Carvão Mineral e Energia

O carvão mineral, de origem fóssil foi uma das primeiras fontes de energia utilizada em larga escala pelo homem. Sua aplicação na geração de vapor para movimentar as máquinas foi um dos propulsores da primeira revolução industrial, posto que no fim do século XIX, o vapor também foi aproveitado na produção de energia elétrica. Ao longo do tempo, com o desenvolvimento dos motores a explosão, o carvão foi perdendo espaço na matriz energética mundial para o petróleo e o gás natural.

Atualmente, o carvão é a fonte mais utilizada para a geração de energia elétrica no mundo, correspondendo por 41% da produção total (IEA/ CIAB, 2010; ANEEL, 2009). Na produção de energia primária, que considera outros usos além da produção de energia elétrica, o carvão tem participação de 26%. Conforme projeta a IEA, o minério manterá uma posição semelhante durante os próximos 30 anos.

A principal restrição à utilização do carvão é o forte impacto socioambiental provocado nas etapas do processo de produção e também de consumo. Durante a extração pode se provocar a degradação das áreas de mineração, já a combustão é responsável por emissões de gás carbônico, NOx, SOx, e particulados. Para resolver este problema, projetos de mitigação e investimentos em tecnologia (*Clean Coal Technologies*) estão sendo

desenvolvidos.

### **2.1.1 Reservas, Produção e Consumo de Carvão**

O carvão é o combustível fóssil com maior disponibilidade no mundo. As reservas totalizam 847,5 bilhões de toneladas, quantidade suficiente para atender a produção atual por 130 anos (ANEEL, 2009; WCI, 2005). Ele ocupa a primeira colocação em abundância e perspectiva de vida útil dentre os demais recursos energéticos não renováveis, sendo, a longo prazo, a mais importante reserva energética mundial (TEIXEIRA *et al.*, 2008).

Ao contrário do que ocorre com o petróleo e o gás natural, as reservas de carvão estão bem distribuídas pelos continentes, com ênfase maior no hemisfério norte. São encontradas em quantidades bem expressivas em 75 países sendo três deles: Estados Unidos (27,6%), Rússia (18,2%) e China (13,3%), que concentram mais de 60% do volume total (BP, 2011).

Atualmente, o maior produtor mundial de carvão é a China (2761 Mt/ ano), que também se tornou a maior consumidora do minério, estimulada pelo ciclo de acentuado desenvolvimento econômico (IEA, 2010).

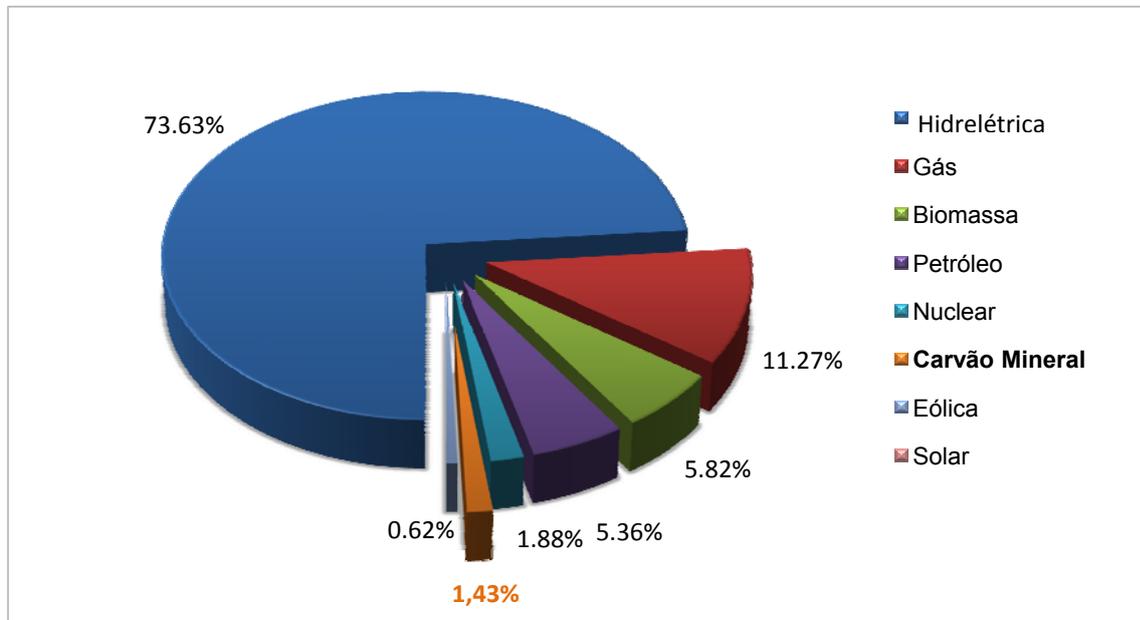
As reservas brasileiras são compostas por carvão de qualidade inferior devido aos elevados teores de cinzas e enxofre. As reservas brasileiras ocupam o 10º lugar no ranking mundial, o que corresponde a 0,5% das reservas totais (IEA, 2010). As maiores jazidas nacionais situam-se nos estados do Rio Grande do Sul (89,25%) e Santa Catarina (10,41%), e as menores, no Paraná (0,32%) e São Paulo (0,02%) (ANEEL, 2009). Como o minério encontrado nessas regiões é pobre, do ponto de vista energético, e não admite, em termos econômicos, beneficiamento nem transporte, faz com que sua utilização seja feita sem beneficiamento e na boca da mina.

### **2.1.2 Geração de Energia Elétrica no Brasil e no Mundo**

O carvão responde pela maior parte da produção da eletricidade em vários países como a China e Estados Unidos, que produzem mais da metade dos 7.775 terawatts-hora (TWh = 1 milhão de megawatt-hora) gerados no mundo. Países como a Alemanha, Polônia, Austrália e África do Sul usam o carvão como base da geração de energia elétrica devido à segurança de suprimento e ao menor custo na comparação com outros combustíveis.

Em 2010, o Brasil tinha uma capacidade instalada de 107.008.431 kW, produzindo 98.212MW em 2197 empreendimentos e com previsão de incremento de 25.967MW nos próximos anos (SEE; ANEEL, 2010). Conforme dados da ANEEL (2010), a geração de

energia hidrelétrica ainda é predominante, apesar de ter sofrido uma redução de 97% para 73%, ocorrendo um incremento da geração termelétrica a partir de biomassa e de gás natural. O carvão, por sua vez, teve um aumento de consumo, mas ainda, tem uma contribuição bem modesta, sendo que, ele representa pouco mais de 1,4% da matriz energética do país. Estes dados podem ser observados na Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Matriz energética brasileira em capacidade instalada por fontes de geração (ANEEL, 2010).

Essa aplicação restrita do carvão nacional é resultante de fatores como a vocação brasileira para a utilização de fontes hídricas na produção de energia elétrica e a baixa qualidade da maior parte do carvão brasileiro, o que inviabiliza seu transporte e afeta o grau de rendimento da usina termelétrica.

### 2.1.3 Geração de energia elétrica a partir do carvão no Brasil

No início do uso do carvão e da sua queima no Brasil, não se obteve muito êxito, pois a tecnologia que era empregada até então era estrangeira e não se adequava às propriedades do nosso carvão, principalmente, no que diz respeito ao teor de cinzas. Com isso o petróleo passou a frente do carvão na geração de energia. Graças a pesquisas do setor siderúrgico e na área do carvão, novas tecnologias foram desenvolvidas e manteve o carvão como uma alternativa.

Atualmente, as usinas termelétricas de Candiota com 796 MW e Charqueadas com 72 MW de potência instalada, localizadas no Rio Grande do Sul, Capivari em Santa Catarina, 100MW, e Figueira no Paraná, 20MW (ANEEL, 2009) produzem energia elétrica a partir do carvão mineral.

Com a crise do petróleo em 1973 e o aumento do preço deste combustível, novas fontes energéticas obtiveram mais investimento vindos do governo federal, como os projetos de usinas hidrelétricas de médio e grande porte e de algumas termelétricas à óleo (sudeste) e a carvão (sul). As usinas hidrelétricas se propagaram em grande número e passaram a contribuir junto com o carvão e o petróleo com o parque elétrico nacional.

Em 2002, o Brasil tinha uma capacidade de produção de 74.000 MW, sendo que a origem desta energia era predominantemente de hidrelétricas (97%). A justificativa desta preferência se deve a classificação das hidrelétricas como fontes mais “limpas” de energia, porém existe um problema a se enfrentar: as estiagens (com frequências e duração variáveis), o que pode limitar a capacidade da usina e sua produção. Foi o que o país presenciou no ano de 2001, a chamada crise energética, que ocorreu devido à queda de capacidade dos reservatórios de água em 32% após a estiagem. Após esta crise o perfil da matriz energética foi alterado.

Analisando a geração de energia elétrica, as reservas nacionais de carvão seriam suficientes para suprir as termelétricas, totalizando 28000 MW, durante 100 anos. Atualmente existem 9 termelétricas em operação no país, duas em fase de construção e 14 em fase de estudos para viabilização técnica espalhadas pelo país. A tabela 2.1 a seguir, mostra as usinas termelétricas em operação e potências de geração.

**Tabela 2.1:** Usinas termelétricas em operação e potências instaladas (ANEEL, 2009).

USINA	POTENCIA (MW)	MUNICÍPIO	UF	EMPRESA
São Jerônimo	20	São Jerônimo	RS	CGTEE
P. Médici A/B/C	796	Candiota	RS	CGTEE
Figueira	20	Figueira	PR	COPEL
Charqueadas	72	Charqueadas	RS	Tractebel
J. Lacerda I e II	232	Capivari de Baixo	SC	Tractebel
J. Lacerda III	262	Capivari de Baixo	SC	Tractebel
J. Lacerda IV	363	Capivari de Baixo	SC	Tractebel

Ao projetar a diversificação da matriz nacional, o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2008 - 2017 prevê a expansão da utilização do carvão e o aumento da capacidade de geração de 1415 MW, em 2008, para 3175 MW em 2017 (MME, 2009) e para 3205 MW em 2019 (MME, 2010). Tanto que o Governo Federal destinou R\$ 58 milhões do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) a essas usinas.

## 2.2 Tecnologias de Gaseificação e Limpeza de Gases

No início, a combustão do carvão era limitada à queima pulverizada, o que gerava uma baixa eficiência, devido ao uso de equipamentos dimensionados para carvões com propriedades distintas do brasileiro. Além desse método se utilizava também na combustão do carvão grelhas móveis, que consiste de uma esteira com espalhador ou uma esteira com gaveta ou grelha tipo cascata. Esses problemas de tecnologia inadequada desencadearam avanços nas pesquisas visando otimizar os processos e equipamentos utilizados na queima do carvão.

Atualmente, as rotas mais importantes de tecnologias são:

- Combustão pulverizada supercrítica;
- Combustão em leito fluidizado pressurizado (PFBC)
- Gaseificação integrada a ciclo combinado (IGCC),

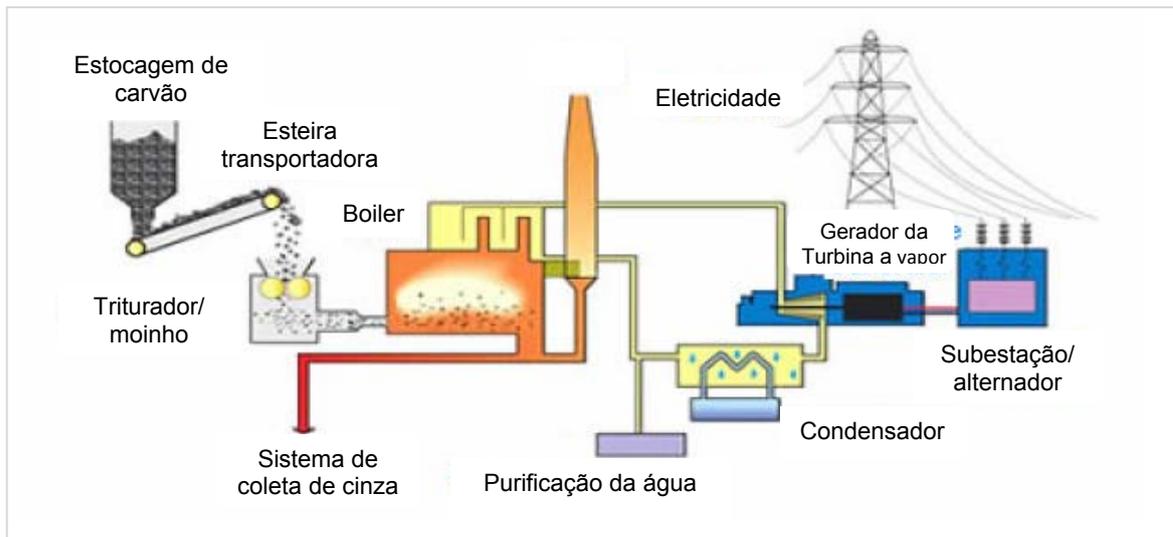
Essas tecnologias, a médio prazo, deverão reduzir as incertezas e resistências da sociedade para o consumo do carvão (IEA, 2010).

As usinas com ciclo combinado de gaseificação integrado (*Integrated Gasification Combined Cycle* - IGCC) são vistas por muitos como o próximo estágio lógico no desenvolvimento de termelétricas a carvão. As usinas IGCC são mais eficientes e possuem maior controle de poluição do que as termelétricas críticas e super-críticas.

As plantas baseadas nestas novas tecnologias não são teóricas, já operam hoje nos EUA, na Europa e no Japão (IEA, 2010). No Brasil as usinas de Jacuí e Candiota III utilizam a combustão pulverizada. Além desta a combustão pulverizada apresenta boas perspectivas para utilização nacional.

### 2.2.1 Combustão Pulverizada

A combustão pulverizada é composta pelas etapas representadas na Figura 2.2 abaixo:



**Figura 2.2:** Modelo representativo de uma usina termelétrica a carvão com combustão pulverizada (CP) (WCI, 2005).

Neste processo o carvão mineral passa pelas etapas de britagem e moagem, sendo depois transportado para os queimadores na caldeira da usina, por meio do ar de combustão. A queima é realizada em suspensão e os gases da combustão escoam através da caldeira, trocando calor com as paredes e feixes da tubulação. Esse processo gera vapor de alta pressão que movimenta o conjunto turbina/alternador, pré-aquece a água da caldeira e o ar de combustão.

Depois de passar pela caldeira, os gases são conduzidos através de sistemas de purificação para a remoção de particulados e dos gases ácidos  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ , para, posteriormente, serem liberados na atmosfera.

O vapor, à alta temperatura e pressão, movimenta a turbina de condensação acoplada ao alternador, gerando energia elétrica, a partir da transformação de calor em trabalho. Do condensador, acoplado na parte inferior da turbina, o vapor condensado na saída da turbina, retorna à caldeira, passando por etapas de tratamento/condicionamento, compostas de desaeração, injeção química, estágios de aquecimento e bombeamento. Após este estágio, o vapor condensado soma-se à água de alimentação da caldeira, para repor as perdas do ciclo.

Nos processos atuais de combustão pulverizada (CP), a queima do carvão como partículas pulverizadas, aumenta substancialmente a eficiência da combustão e da conversão. A maioria das tecnologias modernas de CP atinge 99% de eficiência na combustão. A eficiência de conversão da energia térmica em energia elétrica pode chegar a 43%, no caso de plantas com ciclo a vapor supercrítico (temperatura entre  $700^\circ\text{C}$  e  $720^\circ\text{C}$ ).

Ganhos adicionais de eficiência podem ser alcançados, mas atualmente o encarecimento do sistema não os justifica. Esperam-se, porém, melhoramentos futuros, elevando a eficiência a 50%, sem aumento de custo. São necessários equipamentos adicionais para controle de emissões de SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub> e de material particulado. Uma usina que utiliza esta tecnologia é a usina de Herne na Alemanha, com capacidade instalada de 950 MW (MME/EPE, 2006).

### **2.2.2 Combustão em Leito Fluidizado**

Os sistemas de combustão em leito fluidizado, FBC (*Fluidised Bed Combustion*), permitem a redução de enxofre (até 90%) e de NO<sub>x</sub> (70-80%). Esta redução de emissões está relacionada ao emprego de partículas calcárias e de temperaturas inferiores que o processo convencional de pulverização.

Esta tecnologia apresenta algumas vantagens em relação à combustão pulverizada convencional, como a redução de enxofre sem perdas de eficiência térmica e a flexibilidade e eficiência para a queima de combustíveis com características diferentes, como, por exemplo, resíduos e carvões de baixa qualidade, sendo, portanto, adequada também a sistemas de incineração (CHILDRESS, 2002; ATLAS ANEEL, 2009).

Na combustão em leito fluidizado, o carvão é queimado dentro de um reator pressurizado, onde o ar se mistura com o combustível em um leito em movimento turbulento. Devido a sua alta eficiência de queima é possível operar com temperaturas menores que a combustão convencional (combustão pulverizada). Com a elevação da pressão, o vapor direcionado para as turbinas gerando eletricidade (WCI, 2005). Neste processo, os gases, após passarem pela caldeira, geram vapor, pré-aquecem a água e o ar de combustão. Depois desta etapa eles passam pelo sistema de remoção de particulados. Os gases de combustão na forma de vapor podem, também, ser reciclados para auxiliar na manutenção dos parâmetros do ar de fluidização (teor de inertes).

A principal diferença entre as usinas que possuem tecnologia de leito fluidizado e as que possuem a queima pulverizada ocorre nos equipamentos e nos sistemas de movimentação dos combustíveis e reagentes. Nas unidades que apresentam leito fluidizado existe maior flexibilidade quanto à granulometria e homogeneidade do combustível, quanto devem ser nas caldeiras de queima pulverizada, condição que permite arranjos de processo diferentes e mais simples nos sistemas de recebimento, estocagem e manuseio do combustível. A utilização de altas temperaturas (aproximadamente 1600°C) na queima de carvão pulverizado faz com que a radiação seja o agente de troca térmica mais importante dentro da caldeira, o que não acontece na queima em leito fluidizado. Neste caso, o

combustível é queimado, disperso em uma grande massa de sólidos particulados em movimento, a uma temperatura entre 250 e 900°C, apresentando uma menor transferência de calor por radiação, compensada pelas trocas térmicas que ocorrem por convecção.

As tecnologias de leito fluidizado existentes são:

- Combustão em leito fluidizado em pressão atmosférica (BFBC) e de leito circulante (CFBC);
- Combustão em leito fluidizado pressurizado (PFBC) e de leito pressurizado circulante (CFBC).

A combustão em leito fluidizado pressurizado (PFBC) é uma tecnologia que está em desenvolvimento, principalmente na Alemanha (IEA, 2011 *online*). Os sistemas pressurizados já construídos são poucos, existem duas usinas no Japão que operam com esta tecnologia a de Karita e Osaki e outra nos EUA em Ohio, que utilizam a tecnologia de vapor supercrítica (IEA, 2011 *online*).

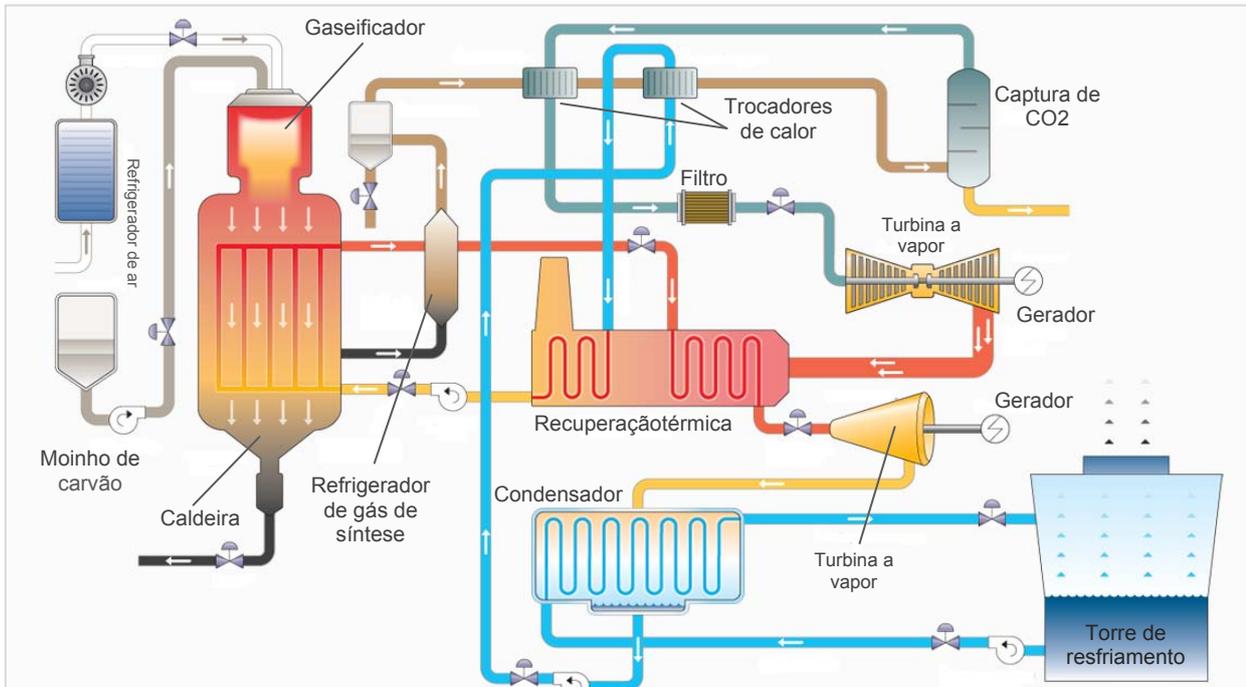
### 2.2.3 Gaseificação Integrada e Ciclo Combinado (IGCC)

A tecnologia de gaseificação e combustão combinadas do carvão, IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*), é recente. Neste caso, o carvão não é queimado diretamente, pois ele reage com o vapor d'água a alta temperatura e um oxidante subestequiométrico que pode ser ar ou oxigênio (processo de gaseificação), dando origem a um gás combustível de médio poder calorífico, o gás de síntese, "Syngas". Esse gás, formado, principalmente, de hidrogênio e monóxido de carbono, após ser limpo, pode ser queimado em turbinas a gás, onde o calor residual dos gases de exaustão pode ser recuperado e aproveitado por meio de uma turbina a vapor (ciclo combinado). O gás de síntese também pode ser produzido a partir de uma mistura de carvão com outros produtos, como a biomassa, coque de petróleo ou sobras de rejeitos (WCI, 2005).

O enxofre está presente principalmente na forma de H<sub>2</sub>S e um pouco na forma de COS, sendo que o H<sub>2</sub>S é mais facilmente removido que o SO<sub>2</sub>. Mesmo que na gaseificação não se gere nenhum NO<sub>x</sub>, na queima subsequente do gás de síntese, observa-se a formação de óxidos de nitrogênio (IEA, 2011, *online*).

A Figura 2.3, a seguir, apresenta um esquema simplificado de uma planta típica de IGCC a carvão. Pode-se observar nesta figura que o carvão é alimentado no gaseificador, onde é parcialmente oxidado à temperatura próxima à 1500°C e sob pressão de 80 bar (MAURSTAD, 2005). A alta temperatura assegura que a cinza é convertida em uma escória líquida com baixa viscosidade, de modo que, possa fluir facilmente para fora do

gaseificador. A maioria das plantas utiliza oxigênio como oxidante, obrigando a instalação de uma unidade de separação de ar (Air Separation Unit – ASU). Além da ASU, existe a necessidade de instalações destinadas à purificação do gás de síntese, confirmando a complexidade das plantas em ciclo combinado.



**Figura 2.3:** Representação de uma planta que utiliza sistema IGCC à carvão (FLOWSERVE, 2009).

O gás de síntese quente possui calor sensível que pode ser recuperado em trocadores de calor para a produção de vapor para a turbina. Porém para a combustão em turbinas a gás, o gás de síntese precisa atender as exigências da turbina em relação à pureza e ao poder calorífico. A limpeza do gás de síntese deve garantir a remoção de contaminações (particulados e gases ácidos) para evitar a danificação da turbina. Compostos como alcatrão, por exemplo, condensam a temperaturas abaixo de 300°C e se depositam nos filtros e tubulações. Os particulados causam erosão em turbinas e motores a gás e reduzem drasticamente seu tempo de vida.

Na maioria das plantas industriais o gás de síntese é resfriado após a gaseificação, passa pelo processo de limpeza, e então, é aquecido novamente na unidade de combustão, o que acarreta em um aumento considerável nos custos da planta. Por razões de eficiência, seria essencial a remoção desses contaminantes a temperaturas altas, porém as tecnologias com estas características ainda estão em desenvolvimento (filtração de gases quentes). Os álcalis presentes no combustível tendem a evaporar nas temperaturas do gaseificador. Para a remoção eficiente de materiais particulados são utilizados ciclones, filtros e unidades de lavagem de gás. Este assunto será abordado com mais detalhes na

seção 3 do capítulo 2.

A seleção do processo de gaseificação deve levar em conta as características do combustível, no caso dos carvões, a finalidade do gás e a escala de produção que a planta deve atender. O gaseificador pode utilizar carvão pulverizado, com mistura de vapor e oxigênio produzido por uma planta de fracionamento do ar. Neste caso, as cinzas são retiradas na forma de escória líquida a uma temperatura na faixa de 1500 a 1600°C. Outra opção seria um gaseificador de leito fluidizado circulante, que reduziria os investimentos e a complexidade operacional, pois utiliza ar ao invés de oxigênio e promove a retirada do gás por via seca e abaixo do seu ponto de fusão. Apesar dessas facilidades a qualidade do gás produzido é inferior à produzida por via pulverizada.

A tecnologia IGCC apresenta resultados significativos do ponto de vista ambiental, como a redução das emissões de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$  em 95% e 99%, respectivamente. Apesar disso a eficiência energética que esta tecnologia atinge é um pouco superior a 50% - com estimativas de aumento do potencial de eficiência líquida para 56% no futuro. Para atingir este objetivo, seria necessário empregar turbinas a gás, que possibilitariam reduzir ainda mais as emissões de  $\text{CO}_2$ , gerando um impacto positivo no desempenho de uso do carvão. Existe também, a possibilidade do uso conjunto com tecnologias de captura de  $\text{CO}_2$ . Este é um dos motivos que vem aumentando o interesse do emprego desta tecnologia, frente às demais, mesmo o IGCC se mostrando pouco competitivo devido aos altos custos e a complexidade de operação (WCI, 2005).

Existem cinquenta usinas em todo o mundo que utilizam como tecnologia o IGCC para geração de energia, sendo que destas, apenas 23 utilizam carvão como combustível. Treze destas usinas à carvão estão realmente em operação, as demais estão em construção, planejamento e desenvolvimento. A distribuição destas usinas pelas regiões no mundo é: 11 na América do Norte, 5 na Europa e 7 na Ásia e Austrália (NETL, 2010).

#### **2.2.4 Remoção Mecânica das Partículas Oriundas da Gaseificação/ Combustão do Carvão**

O gás produzido a partir da gaseificação do carvão contém diversas impurezas, que podem ser classificadas como material particulado sólido, alcatrão e contaminantes gasosos. Os principais contaminantes que devem ser controlados em plantas de geração de energia são os particulados e o alcatrão.

A legislação ambiental no Brasil vem evoluindo, tornado-se mais restritiva, conduzindo as usinas à adoção de medidas corretivas de controle ambiental, por vezes, onerosas e,

muitas vezes, destinadas a resolver conflitos emergentes. A Resolução CONAMA 316 de 29 de outubro de 2002 estabeleceu padrões de emissão para dióxido de enxofre e material particulado para fontes fixas, cuja combustão seja realizada nos seguintes equipamentos: caldeiras, geradores de vapor, centrais para geração de eletricidade, fornos, fornalhas, estufas e secadores para geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores.

A FEPAM, órgão ambiental do Estado do Rio Grande do Sul, se baseia nos valores estipulados pela Resolução do CONAMA 316/02. Alguns desses valores de emissões definidos no Licenciamento Ambiental da Usina Termelétrica Charqueadas, por exemplo, são (TISSOT e MISSEL, 2011):

- Material Particulado: 70mg/Nm<sup>3</sup>;
- Dióxido de Enxofre: 280 mg/Nm<sup>3</sup>;
- Óxidos de Nitrogênio: 560 mg/Nm<sup>3</sup>.

Esses valores foram baseados em um teor de 6% de oxigênio nos gases amostrados.

Neste presente trabalho de dissertação de mestrado o foco será a forma de retenção de material particulado, não envolvendo o tratamento dos gases ácidos.

### **Material Particulado**

O material particulado inclui fuligem, poeira, gotas de líquido e outras partículas sólidas emitidas diretamente ao ar, resultantes da combustão. Algumas partículas são formadas na atmosfera pela condensação ou transformação dos gases emitidos. O tamanho dessas partículas pode variar de 10<sup>-3</sup> a 500 µm. Devido ao seu pequeno tamanho, essas partículas podem permanecer em suspensão na atmosfera por períodos indefinidos de tempo, sendo que as partículas de tamanhos maiores depositam-se mais rapidamente e permanecem por um tempo menor na atmosfera em comparação com as de tamanho menor. A velocidade de deposição, das partículas maiores, é usada como parâmetro de projeto de separadores e coletores. As partículas muito pequenas não podem ser separadas por meios gravitacionais, neste caso, utiliza-se um campo elétrico ou centrífugo como força motriz.

O material particulado sólido é arrastado pelo gás produto da gaseificação/combustão. Essas partículas, são arrastadas quando seu tamanho, dentro do reator, torna-se pequeno o suficiente para ser carregado aerodinamicamente pelos gases.

A eficiência de coleta exigida para atender a legislação ambiental é um dos fatores para a seleção dos equipamentos para a remoção de poluentes atmosféricos. A eficiência de coleta dos equipamentos coletores depende, basicamente, da distribuição do tamanho de

partículas no gás a ser tratado.

Os principais métodos e equipamentos utilizados para a separação de material particulado são:

#### **a) Lavadores de gases**

Os lavadores de gases formam uma classe de equipamentos que usa um líquido (normalmente, água) para realizar a coleta de pós ou névoas. Estes equipamentos têm sido largamente utilizados e com grande oferta no mercado. O conceito aplicado neste método é a transferência das partículas sólidas da corrente gasosa para o líquido pela impactação inercial, deposição gravitacional, interceptação ou difusão browniana. Para partículas maiores que 0,5  $\mu\text{m}$ , a impactação inercial é o mecanismo predominante, enquanto que para partículas com diâmetros muito pequenos, a difusão browniana é o principal mecanismo.

O desempenho do lavador está ligado à efetividade que o equipamento tem em provocar a colisão entre as gotas (líquido) e o material particulado. Diversas geometrias e configurações de lavadores são disponíveis, conforme seu princípio de operação e aplicação: lavador Venturi, lavador ciclônico, lavador de filtro úmido, lavador de bandeja e pratos, lavador de leito móvel, lavador spray. Dentre estes, o mais amplamente utilizado após gaseificadores/combustores é o lavador Venturi.

A eventual aplicação de lavadores na limpeza de gases oriundos da gaseificação/combustão envolve, além da coleta de material particulado, o resfriamento brusco do gás devido ao contato com água ou a solução de lavagem.

#### **b) Ciclones**

Os ciclones são equipamentos largamente empregados na separação e coleta de material particulado através da ação da força centrífuga. A força centrífuga acelera as partículas sólidas em suspensão na corrente gasosa contra a parede do ciclone, esta força pode variar entre 5 a 2500 vezes o peso das partículas. Uma vez em contato com a parede, a partícula é coletada, e cai na parte cônica do ciclone, conectada a um reservatório de sólidos ou a algum dispositivo de retirada.

Os ciclones são equipamentos estacionários, e, portanto, não oferecem dificuldades para operações em altas temperaturas e elevadas pressões, com eficiência de coleta elevada. No entanto, sua eficiência típica de coleta para partículas de pequeno tamanho (menores que 10  $\mu\text{m}$ ) é baixa. Apesar disso, sua aplicabilidade não é afetada, já que é, normalmente, utilizado como equipamento primário de coleta, ou seja, diminui a carga de

sólidos da corrente gasosa que segue para um segundo equipamento de coleta mais refinada, que retém as partículas de menor tamanho.

Devido a sua flexibilidade de aplicação, o ciclone é utilizado, com frequência, como separador de material particulado logo após a saída de gaseificadores/combustores, sem a necessidade de resfriamento do gás.

Apesar da aparente simplicidade do ciclone, sua grande complexidade é o escoamento no seu interior. Por este motivo, ainda existem muitos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento a respeito deste equipamento.

O desempenho do ciclone é fortemente dependente de sua geometria e da velocidade de entrada da corrente dos gases, o que limita sua flexibilidade operacional. Uma opção para controlar essa limitação é a instalação de mais de um equipamento em série, ou em paralelo, conforme a necessidade. A eficiência é diretamente proporcional à velocidade e inversamente proporcional ao diâmetro da partícula, e o aumento da eficiência do ciclone implica em um aumento da perda de carga.

### ***c) Precipitadores Eletrostáticos***

Os precipitadores eletrostáticos são usados há muitos anos como meio efetivo para controle de material particulado em emissões atmosféricas, pois exibem qualidades superiores a outros tipos de filtros, como: baixa potência elétrica para seu funcionamento; baixa perda de carga no escoamento; alta eficiência (99-99,9%) de retenção de material particulado, mesmo para partículas menores que 0,3  $\mu\text{m}$ ; simplicidade de manutenção e baixos custos operacionais.

Os precipitadores eletrostáticos utilizam forças eletrostáticas para atrair partículas a um eletrodo coletor e, com isso, aumentar a velocidade de translação das partículas imersas em uma corrente de gás. As forças eletrostáticas são criadas pela adição de cargas elétricas às partículas sólidas ou aerossóis. A coleta de particulados nestes equipamentos consiste de três etapas principais: o carregamento elétrico das partículas, a coleta das partículas e a remoção do material particulado. O carregamento é feito pela passagem das partículas em um campo elétrico, não uniforme, produzido pela presença de um eletrodo de descarga e um eletrodo de coleta. A diferença de potencial elétrico entre os eletrodos produz um campo elétrico. Nas proximidades do eletrodo de descarga, caso o gradiente do campo elétrico for suficientemente alto, tem-se o "Efeito Corona", uma forte ionização dos gases. Os íons produzidos pelo efeito corona tendem a migrar em direção ao eletrodo de coleta, colidindo com as partículas em suspensão. As partículas tornam-se, então, carregadas eletricamente,

deslocando-se dentro do campo elétrico em direção ao eletrodo de coleta.

Quando o material particulado é coletado, atingindo o eletrodo, há a formação de uma capa de material formada pela aglomeração ou coalescência, que precisa ser removida. A remoção é feita por bateção (vibração) periódica do eletrodo, descolando a camada de material, precipitando no fundo do coletor.

Os precipitadores eletrostáticos produzem partículas com carga elétrica suficiente para se obter eficiências de coleta na ordem de *submicrons*. Essa eficiência comumente é maior que 99% de coleta de particulados sólidos.

A resistividade da partícula tem grande influência no desempenho de um precipitador eletrostático.

#### **d) Filtros**

Os filtros para retenção de material particulado serão tratados na seção seguinte com detalhes.

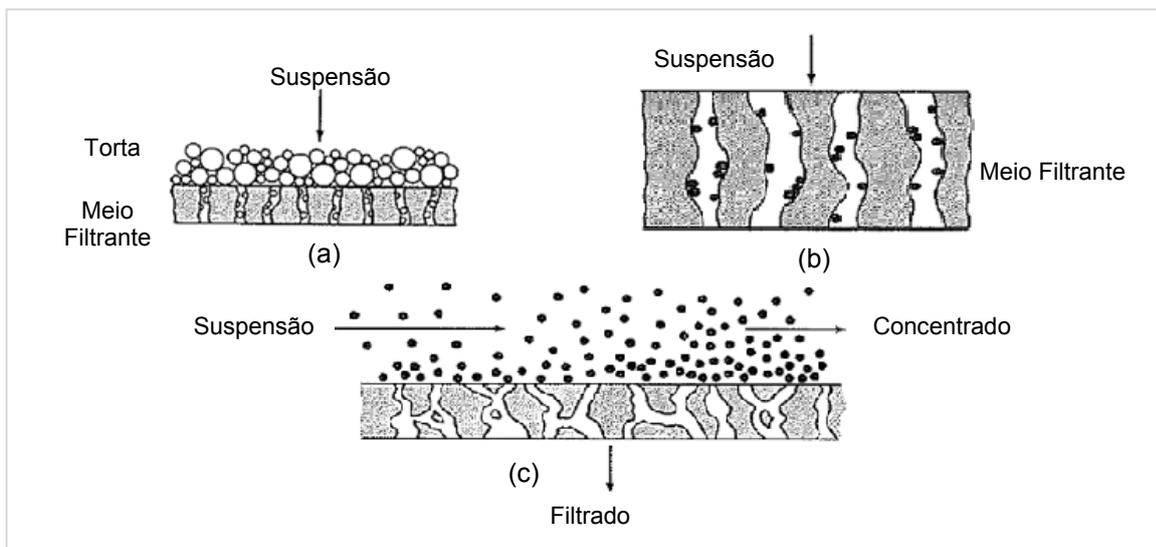
## **2.3 Filtração de Gases- Principais Conceitos**

Dentro da separação física de sólidos, a filtração atua na remoção de partículas sólidas de um fluido que passa através de um meio filtrante onde as partículas sólidas, acima de certo diâmetro ficam depositadas e as de diâmetros menores passam pela barreira. O fluido escoar através do meio filtrante devido a uma diferença de pressão aplicada neste meio, que pode ser efetuada aplicando pressão à montante do meio (filtros de pressão) ou à jusante do meio filtrante (filtros à vácuo).

A maioria dos sistemas que envolvem a remoção de contaminantes está focada nas partículas finas, ou seja, partículas finas o suficiente para ficarem suspensas na atmosfera por longos períodos de tempo. Por este motivo, tanto o tamanho médio da partícula, como sua distribuição de tamanho, têm grande influência sobre o tipo de filtro que será escolhido, considerando a eficiência de filtração, eficiência energética e rentabilidade. Além disso, outro fator que tem papel determinante na eficiência de separação do filtro é a escolha do meio filtrante.

Os filtros são divididos em três principais tipos de mecanismos: filtros de torta, filtros de clarificação e filtros de fluxo tangencial. Filtros de torta separam relativamente grandes quantidades de sólidos na forma de tortas ou lama. Nos filtros clarificadores são removidas

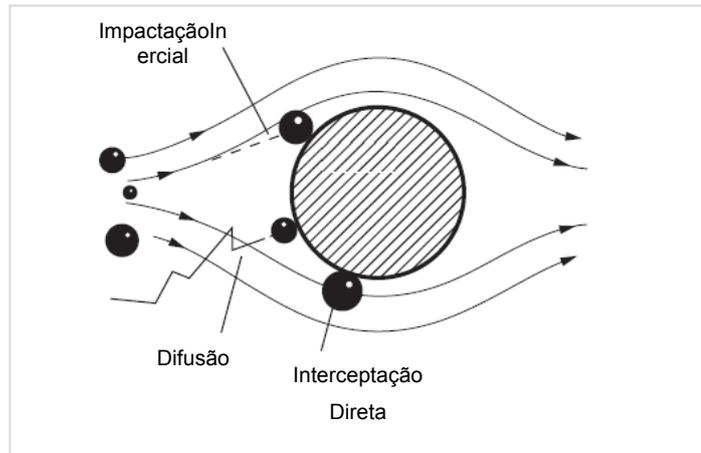
pequenas quantidades de sólidos para se obter um gás limpo. As partículas sólidas ficam retidas no interior do meio filtrante ou em sua superfície externa. Estes filtros diferem dos filtros de torta, pois os poros do meio filtrante são muito maiores em diâmetro que as partículas a serem removidas. Já, nos filtros de fluxo tangencial, o fluxo de alimentação das partículas sólidas passa tangencialmente ao meio filtrante a uma velocidade bastante elevada. O meio filtrante utilizado pode ser metálico, cerâmico ou uma membrana polimérica de poros pequenos. Alguma parte do fluido passa através do meio como um filtrado limpo, deixando uma suspensão mais concentrada para trás. Estes três mecanismos estão representados na Figura 2.4.



**Figura 2. 4:** Mecanismos de filtração: (a) Filtro de Torta; (b) Filtro de Clarificação e (c) Filtro de Fluxo Tangencial (SUTHERLAND, 2008).

A filtração de material particulado em uma corrente gasosa envolve impactação e difusão de partículas. Partículas sendo carregadas aerodinamicamente por uma corrente de gás tendem a seguir um movimento retilíneo e impactar em um alvo de coleta devido a sua massa inercial ser maior que a do gás. Este alvo de coleta pode ser uma malha filamental ou a estrutura porosa de um elemento filtrante. O fenômeno de impactação é mais pronunciado quanto maior o tamanho e a densidade da partícula. As partículas muito pequenas (na faixa de 0,1 a 1 micrometro) também sofrem impacto, porém, devido à pequena inércia destas, a coleta por este fenômeno ocorre, somente, nas linhas de corrente muito próximas de um corpo sólido, ou seja, dentro da camada limite hidrodinâmica de escoamento. Partículas menores que 0,1  $\mu\text{m}$  são coletadas por difusão devido ao movimento browniano das moléculas de gás, que de uma maneira aleatória, podem deslocar as partículas sólidas de uma linha de corrente a outra, até que a partícula colida com um corpo sólido relativamente rígido. Para isso, é necessário que se tenha baixa velocidade de escoamento e pequena dimensão do espaço livre por onde circula a corrente

gasosa. Este fenômeno pode ser observado na Figura 2.5, a seguir:



**Figura 2.5:** Mecanismo da coleta de partículas junto ao meio filtrante (SUTHERLAND, 2008).

Outro ponto importante a ser considerado na filtração é a escolha do meio filtrante, ele deve ser de um material compatível com a suspensão de particulados e seus componentes, por exemplo, na filtragem de ar quente ou de um líquido corrosivo (ácido mineral) ou sólidos abrasivos.

Equipamentos industriais típicos que se utilizam após gaseificadores/combustores são o filtro de mangas e o filtro de leito granular.

### 2.3.1 Filtros de Manga

Um dos equipamentos mais comumente empregado em estações de geração de energia são os filtros de manga (*baghouse*) ou filtros de tecido (*fabric filters*). Estes são usados em grandes fluxos de gás, principalmente na retenção de resíduos e poeiras e para a recuperação de sólidos valiosos oriundos da queima. Na filtração em filtros de mangas, o gás contaminado atravessa o tecido permeável e o material sólido é retido, no tecido, no início do processo de filtração. Com o acúmulo do material sólido retido, há formação de uma camada porosa, denominada "torta". É essa camada porosa que, efetivamente, faz o trabalho de filtração. O aumento da camada de sólidos aumenta também a resistência ao escoamento e o filtro torna-se menos permeável, aumentando a perda de carga. Para possibilitar a operação do filtro, essa camada deve ser removida periodicamente a fim de se manter um limite de perda de carga aceitável.

Embora este filtro seja utilizado em pequenas escalas na filtração de líquidos, o mesmo não ocorre para o gás, pois as unidades são geralmente muito maiores e as taxas de fluxos muito altas. Por este motivo, para o tratamento em pequenas escalas de fluxo de gás, opta-se por outros tipos de filtros.

Diversos tipos de materiais são empregados para a fabricação das mangas e a escolha deve ser feita com base na resistência química deste em relação às características do gás e do particulado a ser filtrado e, principalmente, em relação à temperatura de operação. A temperatura máxima suportada pelo material das mangas pode ser de até 280°C para o caso do politetrafluoretileno (PTFE) (BIZZO, 2010). Já para materiais como minerais e fibras de vidro a temperatura do gás deve estar entre 180 e 300°C e fibras metálicas suportam temperaturas até 600°C (SUTHERLAND, 2008).

A limpeza das mangas é feita por uma injeção de um pulso reverso de gás de alta pressão, a fim de derrubar a camada secundária de material particulado sólido retido no filtro.

### **2.3.2 Filtros Cerâmicos**

Os filtros cerâmicos apresentam um melhor desempenho na limpeza de gases quentes se comparados com os filtros de mangas, já que os filtros cerâmicos são estáveis até 900°C, quimicamente inertes e resistentes a ambientes quimicamente agressivos. Os filtros cerâmicos são, geralmente, constituídos de materiais cerâmicos, cujas fibras estão inorganicamente ligadas, não necessitando de qualquer suporte (SUTHERLAND, 2008) .

A limpeza do elemento filtrante é semelhante ao filtro de mangas ou ao de velas, através de um pulso de ar reverso ou ar comprimido.

### **2.3.3 Filtros de Vela (Candle Filters)**

Um filtro de vela pode ser considerado um filtro de processo, usado, principalmente, para a recuperação de resíduos de processo de fluxos líquidos ou gasosos. Quase sempre tem um formato de cilindro vertical, dentro do qual, um grande número de elementos filtrantes cilíndricos, fechados na parte inferior, fica suspenso a partir de uma placa suporte. O fluxo se dá de fora para dentro dos cilindros internos, sendo que o fluxo de filtrado sobe até a parte superior do elemento filtrante, aberta, onde é direcionado para a saída do filtro, localizada acima da placa suporte. O pequeno volume dos elementos filtrantes e a superfície plana garantem uma completa remoção da torta utilizando um pulso reverso de gás.

O elemento filtrante pode ser de qualquer tipo de estrutura cilíndrica, porém rígida, como por exemplo, um tubo de metal poroso com superfície lisa, de plástico ou cerâmico. Este meio é usado para a filtração de partículas de tamanhos bem pequenos. Os filtros de vela cerâmica são amplamente utilizados para a filtração de gases agressivos, bem como, para fluidos corrosivos a altas temperaturas.

Os filtros de velas cerâmicas possuem uma maior tolerância, pois podem suportar temperaturas acima de 1000°C. Este tipo de filtro combina alta resistência à ruptura e resistência ao choque térmico, alta permeabilidade, alta eficiência de filtração e resistência à corrosão. Podem remover contaminantes e/ ou recuperar produtos de alto valor em aplicações envolvendo hidrocarbonetos halogenados, processos petroquímicos, ativação de catalisadores, craqueamento catalítico de fluidos, incineração de materiais perigosos e gaseificadores de ciclo combinado.

#### **2.3.4 Filtros Granulares**

Dentro da filtração, ou limpeza de gases se destacam os filtros granulares, classificados como filtros de clarificação. O princípio básico da filtração granular é a remoção de partículas suspensas de um fluxo gás-sólido que passa através do meio filtrante composto pelo material granular. As partículas do fluxo ficam retidas sobre a superfície externa dos grânulos devido à interceptação mecânica ou outros fatores como inércia, gravidade, resistência, difusão, etc. O leito granular pode ser inerte ou quimicamente ativo utilizado para remoção de componentes gasosos (como por exemplo, os gases ácidos).

Também chamado de filtro de lavagem a seco (*Dry Scrubbers*), este filtro tem como principais aplicações o tratamento de gases ácidos, remoção de poeira e cinza e tratamento de gases provenientes de processos de incineração e combustão. Pode ser combinado com outros tipos de filtros para uma maior eficiência de remoção de gases ácidos, metais pesados e dioxinas. Além disso, filtros granulares se mostram mais atrativos devido ao baixo custo de operação e construção e maior confiabilidade de operação a altas temperaturas.

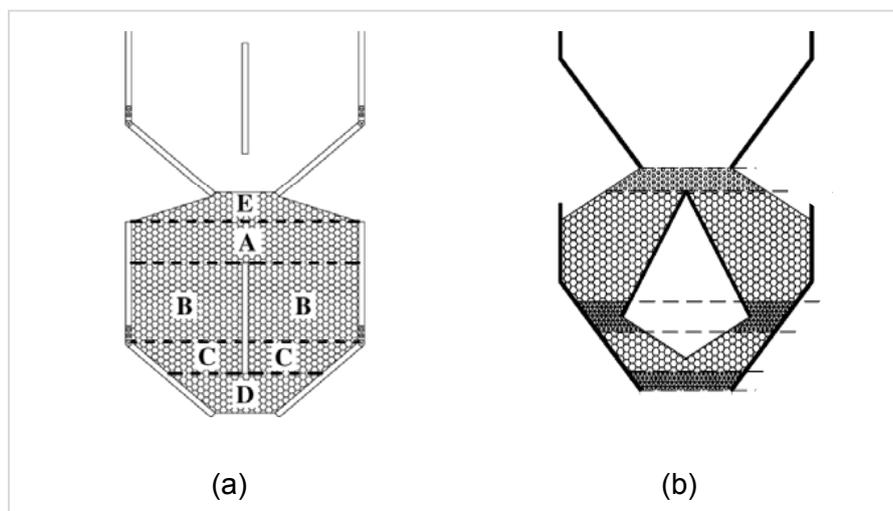
O tamanho das partículas está entre um dos principais parâmetros que limitam a eficiência da coleta de partículas. A velocidade relativa do gás, ou a velocidade de impacto, também podem ser considerados fatores importantes na eficiência de filtração (TIEN & RAMARAO, 2007).

Os filtros granulares podem ser divididos em leito móvel e leito fixo. Em filtros de leito fixo a queda de pressão aumenta continuamente com a retenção das partículas de poeira no filtro, devido à formação de uma torta. A filtração é continua até que seja necessário parar o processo para a regeneração e/ou limpeza do meio filtrante. Quanto menor o tamanho dos grânulos do meio filtrante, maior a eficiência de retenção. Conseqüentemente, o tamanho das partículas que formam o leito é escolhido com a intenção de conciliar a eficiência de retenção e a queda de pressão no leito. Usualmente, o tamanho dos grânulos não é menor que 1 mm em filtros com leito de uma camada.

A maioria dos estudos experimentais em filtros granulares de leito fixo tem como objetivo o estudo de perda de carga e formação da torta relacionando-as com a eficiência de coleta, como no estudo realizado por YANG e ZHOU (2007). Os autores observaram neste trabalho, um filtro granular para altas temperaturas, formado por duas camadas de grânulos (areia e perlita), obteve uma eficiência de coleta de 99,9% devido ao acúmulo de torta na superfície do meio, comparado a utilização da camada única. A camada superior do leito constituída de perlita, não apresentou formação de torta e as cinzas, realizando a filtração profunda ("*deep filtration*" ou clarificação), como era esperado. A camada seguinte, areia, de granulometria inferior, apresentou uma camada de cinza em sua superfície e nenhuma cinza no seu interior, caracterizando um filtro de torta. A presença de duas camadas no filtro fez com que ele apresente alta eficiência de coleta, aliada a seleção eficiente dos materiais que constituirão estas camadas.

STANGHELLE *et al.* (2007) realizaram um estudo que investigou a limpeza de gases à altas temperaturas oriundos de um reator de gaseificação de biomassa, possibilitando a utilização do gás em uma célula de oxidação de combustível. Foi utilizado, neste estudo, um filtro granular, cujo leito era constituído de esferas de óxido de alumínio suportados por venezianas localizadas em painéis compactos. Os resultados obtidos mostram uma perda de carga relativamente baixa associadas a elevadas eficiências de remoção de cinzas volantes. Além disso, em relação a perda de carga obtida, o filtro se mostrou competitivo frente aos filtros de mangas.

Na operação em leito móvel o meio filtrante é constituído de um material granular disposto verticalmente e mantido por grades ou venezianas. Além desta função, a utilização de venezianas, tanto para leito móvel ou fixo, aumenta em duas vezes a superfície de filtragem, comparada com a área frontal do filtro. Os grânulos do leito escoam pela força gravitacional e são removidos no fundo do filtro, enquanto o gás passa horizontalmente através do meio filtrante. O fluxo do leito deve ser mantido constante e uniforme, sem zonas estagnadas. Estas zonas são um problema neste tipo de filtração, pois elas causam um aumento da queda de pressão no filtro com o tempo. Para corrigir este problema, muitos estudos se mostraram eficientes, ao testarem um novo design para as paredes e venezianas (HSIAU *et al.*, 2008) ou ao utilizarem peças corretoras no interior da zona do leito, como apresenta o estudo feito por CHOU e CHEN (2007) com a introdução de uma placa vertical na parte central do leito. Outro modelo de peça corretora foi testado por HSIAU *et al.* (2004), formada por duas placas separadas por um ângulo de 60°, reduzindo substancialmente as zonas estagnadas do leito. Na Figura 2.6 estão os modelos das peças corretoras utilizados nos estudos citados.



**Figura 2.6:** Desenho esquemático das peças corretoras usadas por (a) CHOU e CHEN (2007) e (b) HSIAU *et al.* (2004).

A principal vantagem dos filtros de leite móvel está na regeneração do leite. Ao contrário dos filtros em leite fixo, filtros cerâmicos e filtros de mangas, os de leite móvel tem seu meio em constante regeneração permitindo uma operação contínua, sem a necessidade da interrupção do processo para a limpeza. Por este motivo vem aumentando o interesse das indústrias e das universidades no estudo e aperfeiçoamento deste tipo de filtro.

A performance de um filtro granular de leite móvel, foi avaliada por CHEN *et al.* (2009b), cujo objetivo era remoção de partículas de carvão em testes a frio. Os experimentos demonstraram a eficiência de retenção desta tecnologia de filtração para diferentes velocidades e taxas mássicas de alimentação do leite, mas para concentrações fixas de particulados. O filtro utilizado nos testes foi projetado com venezianas e elementos para correção do escoamento do leite, evitando a formação de zonas estagnadas. Os autores observaram que a velocidade superficial de filtração e a taxa mássica de escoamento dos grânulos do leite afetam a eficiência de remoção de particulados, pois valores muito altos ou muito baixos dessas variáveis dificultaram a coleta de particulado. Porém empregando as condições ideais obtidas através dos testes preliminares foi possível obter uma eficiência de coleta de 99,95%. A partir destes resultados, o estudo apresentou informações importantes sobre o *design* de filtros de leite móvel e dados prévios importantes para futuros estudos utilizando altas temperaturas.

CHEN e HSIAU (2009a) estudaram experimentalmente a formação e o crescimento da torta (acúmulo de poeira na entrada do leite) em um filtro de leite móvel para diferentes condições de filtração, com velocidades do gás variando de 10 a 40 cm/s. Foi desenvolvido um sistema *on-line* para medir a espessura da torta. O resultado deste estudo mostrou que

uma elevada velocidade superficial de filtração resulta em um maior grau de compactação e maior resistência específica da torta, além de uma retenção mais eficiente das partículas menores. Foi possível afirmar que esses resultados podem ser aplicados a diferentes sistemas de filtração em contracorrente.

Na avaliação do desempenho de um novo modelo de filtro de leito móvel, BROWN *et al.* (2003) utilizaram a teoria da similaridade na realização de seus experimentos em condições quase-ambientes e simularam o desempenho do filtro a altas pressões e temperaturas. Os resultados experimentais mostraram que o filtro proposto pode operar com elevadas eficiências de coleta, superiores a 99% e baixas quedas de pressão, sem a necessidade de regeneração periódica do leito através da alimentação contínua de novos grânulos de meio filtrante. O bom funcionamento do sistema proposto foi obtido com a correção prévia das restrições no *design* do filtro.

Um ponto importante de ser estudado em filtros de leito móvel ou fixo é a distribuição do gás na entrada do leito. Este deve ser uniforme para proporcionar um maior uso do meio filtrante e no caso de leitos fixos a formação irregular da torta em determinados pontos do leito. Estudos comprovam que a maioria dos filtros apresenta este problema durante sua operação. Por este motivo, HSU *et al.* (2010) realizaram um estudo que objetivava testar dispositivos defletores localizados na entrada do filtro para uniformizar o fluxo de gás através do meio. A velocidade do gás foi medida ao longo do meio filtrante para vários comprimentos e ângulos dos defletores. Através dos experimentos foi possível determinar um parâmetro ótimo de comprimento e ângulo que resultaram em uma melhor distribuição do gás.

## **2.4 Escoamento através de leitos compactos**

Em muitos processos industriais ocorre o escoamento de líquidos ou gases através de leitos de partículas sólidas. Um exemplo é a filtração em contra-corrente de gases contendo partículas de impurezas através de leitos empacotados. Como foi mencionado anteriormente, o objetivo é a retenção dessas partículas através do choque com os grânulos que formam o meio filtrante. As equações dos modelos empíricos que definem o escoamento através de leitos compactos serão tratadas nesta seção.

A taxa de transferência de energia cinética do fluido para as partículas sólidas e, portanto, a perda de carga no escoamento através do leito, está relacionada aos mecanismos físicos que ocorrem durante o escoamento. Num leito completo a trajetória do fluido é constituída por muitos canais paralelos e que se comunicam. Os canais não tem

diâmetro constante, mas repetidamente sofrem expansões e restrições e se curvam nas mais diversas direções, à medida que as partículas obstruem temporariamente as passagens. Esses canais não possuem a mesma seção reta média, nem mesmo o comprimento total constante. No escoamento através destas passagens a fase fluida é repetidamente acelerada e desacelerada e sofre repetidas perdas de energia cinética. Além disso, as superfícies rugosas das partículas provocam as perdas usuais por arraste e por atrito peculiar.

É sabido que, o escoamento através de canais abertos será mais rápido que o escoamento através de canais estreitos e paralelos, pois a queda de pressão por unidade de comprimento do leito deve ser constante, independente do canal que se estiver considerando. Por esta razão, a transição do escoamento laminar para turbulento ocorrerá a uma vazão do fluido muito menor do que ocorreria em canais estreitos.

Fica claro que neste mecanismo físico, descrito acima, a transferência de momento do fluido para as partículas é consequência de uma perda pelo arraste e uma perda de energia cinética, dada pela Equação (2.1), ou seja,

$$(\tau g_c)_{Total} = (\tau g_c)_{arraste\ e\ atrito} + (\tau g_c)_{Energia\ cinética} \quad (2.1)$$

onde  $g_c$  é utilizado como um fator de proporcionalidade, no caso em que sistemas onde se define massa ou força.

Nas velocidades de escoamento baixas (como é o caso da velocidade utilizada neste trabalho) através de passagens mais estreitas, as perdas de energia cinética são pequenas em comparação com as perdas pelo arraste. Já nas velocidades elevadas, as perdas de energia cinética podem superar completamente as perdas por arraste.

#### 2.4.1 Cálculo da Perda de Carga em um Filtro Granular

A perda de carga em um filtro granular é um dos principais interesses nos estudos desse tipo de filtro para limpeza de gases. NEIVA e GOLDSTEIN (2003) desenvolveram um estudo para determinação do aumento da perda de carga de um sistema de filtros de leito fixo, devido à formação da torta. Neste estudo, os autores utilizaram um determinado conjunto de condições de processo distinto e diferentes características de torta, resultado da tensão devido à compressão oriunda da ação da força de arraste do escoamento através da desta.

Para o cálculo da perda de carga através de leitos compactos, se utiliza com êxito a Equação(2.2) conhecida como Equação de Kozeny-Carman. Esta equação foi originalmente

deduzida por Kozeny, que utilizou um modelo simplificado, com diversos tubos capilares de comprimentos e diâmetros iguais para descrever o leito compacto.

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = K_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_s}{d_p^2} \quad (2.2)$$

onde  $\Delta P$  é a perda de carga no meio poroso (Pa),  $\varepsilon$  é a porosidade do meio (adimensional),  $d_p$  é o diâmetro médio das partículas (m),  $\mu$  que representa a viscosidade (Pa.s) e  $u_s$  a velocidade superficial do fluido no meio poroso ( $m.s^{-1}$ ). KOZENY (1927 *apud* TIEN e RAMARAO, 2007) encontrou  $K_1$  igual a 64. CARMAN (1937), através de dados experimentais de escoamentos através de leitos empacotados, encontrou um valor para  $K_1$  igual a 180.

Com o aumento da velocidade do fluido (ou, mais precisamente, com o aumento do número de Reynolds), as perdas por energia cinética se tornam mais significativas. A queda de pressão resultante da perda por energia cinética é dada pela Equação (2.3).

$$\frac{(-\Delta P)}{L} = K_2 \frac{\rho u_s^2 (1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} \quad (2.3)$$

A expressão, apresentada na Equação (2.3) acima, é a primeira obtida por BURKE E PLUMMER (1928 *apud* TIEN e RAMARAO, 2007) para prever a perda de carga associada com o escoamento turbulento através do leito de partículas. A Equação (2.2) prediz a perda de carga causada pelo arraste, enquanto que a Equação (2.3) apresenta a perda de carga resultante da perda por energia cinética, podendo ser adicionadas, formando uma relação geral para escoamento através de leitos granulares. Esta relação pode ser escrita conforme a Equação (2.4) a seguir:

$$\left(\frac{-\Delta P}{L}\right) \frac{d_p}{\rho u_s^2} \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} = K_1 \frac{1-\varepsilon}{N_{Re}} + K_2 \quad (2.4)$$

A Equação (2.4) é conhecida como Equação de Ergun (ERGUN, 1952), onde  $K_1=150$   $K_2=1,75$ , valores obtidos experimentalmente.

#### 2.4.2 Determinação dos Parâmetros Estruturais - Permeabilidade

Dentre os dois parâmetros macroscópicos presentes na caracterização do escoamento em meios porosos, destaca-se, neste trabalho a permeabilidade.

De acordo com a Lei de Darcy, para escoamentos em velocidades baixas, a velocidade superficial do fluido sobre um meio poroso é diretamente proporcional à perda de carga através do meio, conforme a equação (2.5):

$$\Delta P = \left(\frac{1}{k}\right) \mu L u_s \quad (2.5)$$

onde  $L$  é a espessura da camada de leito (m) e  $k$  é a permeabilidade hidráulica ( $m^2$ ) que depende das características estruturais do meio poroso. Este fenômeno foi observado em suas experiências de escoamento em um leito formado por partículas com distribuição de tamanhos uniforme. Assumindo um perfil de escoamento unidimensional e uniforme, a queda de pressão através de um meio poroso poderia ser expressa em função da velocidade superficial através do meio.

Verifica-se experimentalmente que a Lei de Darcy não é válida para escoamentos a elevadas velocidades ou escoamentos de gases a velocidades (ou pressões) baixas, caso em que a condição de não deslizamento pode ser válida.

O parâmetro  $k$ , ou seja, a permeabilidade do meio poroso representa a condutividade do meio. Este parâmetro leva em conta a influência da estrutura do meio poroso no comportamento fluidodinâmico deste e é determinada experimentalmente por permeamtria através de um conjunto de medidas de vazão e queda de pressão efetuados com a amostra. Com inclinação da curva dos dados experimentais de vazão ou velocidade de filtração  $u$  versus a perda de carga  $\Delta P$  se calcula a permeabilidade hidráulica.

Existem, também, correlações que possibilitam estimar a permeabilidade, baseadas em modelos, como é o caso do Modelo Capilar. Este é um modelo simples que permite correlacionar a permeabilidade com alguns parâmetros estruturais da matriz porosa, como na Equação 2.6.

$$k = \frac{(\varphi d_p)^2 \varepsilon^3}{36\beta(1-\varepsilon)^2} \quad (2.6)$$

Esta equação, conhecida como equação de Blake-Kozeny, relaciona a permeabilidade ( $k$ ) com a porosidade ( $\varepsilon$ ) e propriedades estruturais das partículas do meio filtrante. O  $\varphi$  representa a esfericidade da partícula (adimensional) e  $\beta$  é denominado fator de forma (adimensional), depende da forma da seção transversal do duto e é calculado de acordo com essa geometria (BERKER, 1963 *apud* MASSARANI, 2002).

Substituindo a Equação (2.6) de  $k$  no lugar de  $K_I$  na equação de Kozeny-Carman original (2.2), chega-se a seguinte expressão geral para a perda de carga, apresentada na Equação (2.7):

$$\Delta P = \left[ \frac{36\beta(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right] \left[ \frac{1}{(\varphi d_p)^2} \right] \mu L u \quad (2.7)$$

Dentre as geometrias, da seção transversal do duto, apresentadas por BERKER, escolheu-se a geometria retangular, devido à semelhança com a geometria de filtração deste trabalho. O cálculo do fator  $\beta$  para a seção retangular utiliza as equações (2.8), (2.9) e (2.10) a seguir:

$$\beta = \frac{16}{(1+\alpha)^2 f} \quad (2.8)$$

$$f = \frac{16}{3} - \frac{1024}{\pi^5} \alpha \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\text{TAN}(am)}{(2n+1)^5} \quad (2.9)$$

$$m = (2n + 1)\pi/(2\alpha a) \quad (2.10)$$

onde  $a$  representa a meia largura na seção retangular e  $\alpha a$  representa a meia altura. O intervalo de aplicação da Equação (2.8) é  $0 \leq \alpha \leq 1$  e  $1,78 \leq \beta < 3$ .

Além da geometria retangular, poderia se destacar também a seção transversal em formato circular, que apresenta o fator  $\beta$  igual a 2 (BERKER, 1963 *apud* MASSARANI, 2002).

A Equação (2.6) permite correlacionar, no contexto do modelo capilar, a permeabilidade do leito com as propriedades das partículas e a porosidade do meio. A experimentação indica que o valor do parâmetro estrutural  $\beta$  está compreendido entre 4 e 5 para meios com porosidade de até 50%. Para meios expandidos o valor de  $\beta$  aumenta significativamente com a porosidade quando  $\varepsilon > 0,75$  (MASSARANI, 2002).

XU e YU (2008) realizaram uma ampla comparação entre as considerações empíricas utilizadas na equação de Kozeny-Carman para obter uma relação entre a permeabilidade  $k$ , o parâmetro  $\beta$  e a teoria da geometria relativa à existência dos poros, para meios porosos homogêneos.

Outro modelo matemático, com base em uma adaptação das equações de Kozeny-Carman, foi desenvolvido por STEVENSON (1997). Neste caso foi considerado um fluxo através de meios porosos não homogêneos e a probabilidade da captura da partícula quando esta passa próximo aos grãos do filtro. O principal objetivo deste trabalho foi a obtenção de um modelo que pudesse auxiliar no projeto de filtros granulares visando a predição de alguns aspectos do comportamento do fluxo durante o funcionamento destes.

Esse é um dos interesses que levam atualmente muitos pesquisadores a utilizar ferramentas de CFD (*Computational Fluid Dynamic*), para a predição, otimização ou aumento de escala de equipamentos em seus trabalhos. O próximo capítulo irá tratar dos fundamentos da fluidodinâmica computacional e a aplicação desta ferramenta na resolução de problemas como o escoamento através de leitos granulares.

## Capítulo 3

# Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD) - Metodologia Matemática

*Neste capítulo serão abordados alguns aspectos relacionados à simulação fluidodinâmica, além da apresentação das metodologias matemáticas empregadas nas simulações. Alguns estudos computacionais aplicados à área de retenção de particulados para vários tipos de filtros também serão apresentados.*

### 3.1 Utilização do Método Computacional

O uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos de engenharia, como escoamento de fluidos, é hoje possível devido ao desenvolvimento de computadores de alta capacidade de processamento e ao surgimento de modernas técnicas numéricas.

Para resolver um determinado tipo de problema em engenharia tem-se a disposição, basicamente, três ferramentas:

- métodos analíticos;
- métodos numéricos (simulação numérica);
- métodos experimentais em laboratório.

Os métodos analíticos são usados na obtenção de soluções do tipo fechada, ou seja, podem ser expressas como funções matemáticas conhecidas. A principal desvantagem dos métodos analíticos é a aplicação que se restringe a problemas com geometrias simples e cujas hipóteses simplificativas ficam distantes do fenômeno real. Porém, as soluções analíticas são muito importantes na validação dos modelos numéricos.

Os métodos experimentais possuem a vantagem de se tratar com a configuração real do problema a ser estudado e podendo-se verificar novos fenômenos ou dificuldades. No entanto, o custo é geralmente elevado, impossibilitando, muitas vezes a execução.

Já a simulação numérica não apresenta restrições, podendo resolver problemas com condições de contorno complicadas. Isto, aliado aos pacotes de geometria em simuladores presentes no mercado, permite uma visualização simples do fenômeno físico, sob várias condições. O maior problema deste método é o tempo computacional, pois mesmo simulações relativamente simples podem levar minutos para que as iterações cheguem a um nível de convergência ou erro numérico aceitável.

Atualmente, as ferramentas de simulação começam a ser integradas com outras ferramentas numéricas, criando um ambiente de trabalho iterativo, em que se chega praticamente ao projeto final do equipamento através de computadores, deixando para as ferramentas de laboratório as experiências finais de ajuste e teste do equipamento (MALISKA, 2004).

A tendência que se observa, portanto, é a realização de experiências em laboratório cada vez mais sofisticadas, com o intuito de usar os resultados na corroboração de modelos matemáticos e numéricos, na investigação e entendimento de novos fenômenos que necessitam ser modelados matematicamente e na avaliação final de um projeto. A tarefa repetitiva ficará a cargo do computador.

O que deve ser praticado é a associação adequada da simulação numérica com experiências selecionadas em laboratório. A união dessas técnicas resultará em um projeto melhor e mais barato. Este é, sem dúvida, o caminho da engenharia moderna, em que a simulação numérica desempenhará cada vez mais, um papel decisivo nos custos e na qualidade do projeto, caminhando lado a lado com a experimentação de laboratório.

A simulação numérica poderá apresentar alguns problemas como a estabilidade e consistência que podem dificultar a obtenção de resultados fisicamente coerentes. Nem todas as técnicas numéricas são adequadas para todos os tipos de problemas da engenharia, sendo necessária a escolha de uma ou mais técnicas eficientes para cada caso.

Existem dois tipos de erros que podem estar presentes na solução numérica quando os resultados são comparados com a realidade de um problema físico. Em um primeiro nível estão os erros numéricos, estes são resultados da má solução das equações diferenciais. Para detectá-los e testar a qualidade do método numérico utiliza-se a validação numérica, que se baseia na comparação da solução obtida com outras soluções analíticas ou

numéricas e verifica-se se equação foi corretamente resolvida.

No segundo nível estão os erros resultantes do uso de equações diferenciais que não representam adequadamente o fenômeno, utilizando, neste caso a validação física, que se preocupa com a fidelidade do modelo matemático com o problema físico. A ferramenta numérica é adequada e confiável quando se tem um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais e de um modelo matemático que represente com fidelidade o fenômeno físico.

### 3.2 Métodos Numéricos de Discretização

Os métodos numéricos tradicionais para a solução de equações diferenciais são: Métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Volumes Finitos (MVF) e de Elementos Finitos (MEF).

Inicialmente os problemas na área de mecânica dos fluidos eram resolvidos empregando-se MDF, enquanto que MEF era empregado na solução de problemas de mecânica dos sólidos, ou seja, de elasticidade. Os problemas de elasticidade, por não possuírem termos advectivos, assemelham-se a problemas puramente difusivos de transferência de calor, de característica linear, ao contrário do que acontece com problemas de escoamento. Estes, do ponto de vista físico são altamente não lineares, pois envolvem as equações de Navier-Stokes.

Por este motivo, até o início da década de 1970, o MDF, apesar de ser largamente utilizado na área de fluidos, não possuía ferramentas para tratar geometrias complexas. Já o MEF era hábil no tratamento da geometria, mas sem ferramentas para tratar os termos advectivos presentes nas equações de movimento. Uma das limitações do MDF é a não execução do balanço de massa local nos volumes do domínio em estudo. Aproximam-se as equações governantes através de expansões em séries de Taylor.

Por esta razão foram desenvolvidas pesquisas para o aprimoramento do método dos volumes finitos (MVF), no qual as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação no volume elementar.

A possibilidade de associar a interpretação física à matemática influenciou para que se passasse a usar MVF no lugar de MDF. Estes dois métodos por serem semelhantes podem ser muitas vezes confundidos. O MDF é simplesmente a substituição do operador diferencial pelo seu correspondente numérico, enquanto que o MVF realiza o balanço de conservação

da propriedade para cada volume elementar para obter a correspondente equação aproximada. Logo, o MDF, assim como, MEF trabalham apenas com os pontos da malha e não com volumes de controle e, portanto, não são conservativos em nível discreto.

Do ponto de vista dos pacotes comerciais o MVF é o método mais usado em problemas industriais envolvendo escoamento de fluidos e transferência de calor e massa, e isto se deve a robustez e as características conservativas do método. Ele é baseado na realização de um balanço (massa, quantidade de movimento ou energia) sobre um volume de controle determinado. No limite, quando o volume tende a zero, obtém-se a forma diferencial do balanço, ou seja, a equação diferencial de conservação. Considerando um número de volumes muito pequenos e considerando que para tratar esses volumes deve-se discretizar as equações, o conjunto de equações diferenciais se reduz à simples equações de balanço na forma finita. Desta forma, não existe a possibilidade da existência de gerações/sumidouros de quantidades (massa, quantidade de movimento e energia) no interior do domínio de cálculo. Por outro lado, se a conservação das propriedades é satisfeita apenas via condições de contorno, podem existir gerações/sumidouros das propriedades de origem numérica dentro do domínio, o que modificará o perfil da solução na região.

Existem duas maneiras de se obter as equações de volumes finitos: fazendo um balanço de volumes elementares da propriedade que está sendo conservada ou partindo da equação diferencial na forma conservativa e integrá-la sobre o volume elementar, no espaço e no tempo. Estes dois métodos são equivalentes, pois a dedução das equações diferenciais passa pela realização de um balanço num volume infinitesimal.

Todos os métodos utilizados para resolver escoamentos tendem para objetivos comuns, ou seja:

- solução de escoamentos sobre geometrias complexas;
- conservação das propriedades do fluido localmente;
- economia de tempo computacional.

### **3.3 Níveis de Formulação dos Modelos**

A obtenção da solução de problemas físicos requer uma adequação a modelos matemáticos para que se possa resolvê-los com tempos computacionais não-proibitivos e para que os fenômenos físicos em questão sejam adequadamente representados, o que torna esse objetivo uma tarefa complicada.

Para obter a equação, é necessário saber em que nível os balanços de conservação são realizados: em nível molecular (originando uma equação para cada molécula) ou sobre volumes de controle. Nesses extremos varia muito a complexidade dos métodos numéricos adequados a cada situação.

A Tabela 3.1 apresenta os diversos níveis de formulação dos modelos.

**Tabela 3. 1:** Níveis de formulação de modelos (MALISKA, 2004).

Nível em que os balanços de conservação são efetuados		Informações Necessárias	Tipo de equação resultante	
1	MOLECULAR	Conservação para cada molécula $V \ll L_m^3$	– Massa molecular; – Leis de troca de quantidade de movimento; – Campos de forças: elétricos, magnéticos, etc.	Equação para cada molécula.
2	CONTÍNUO	Balanços onde: $t_m \ll t \ll t_t$ $L_m \ll L \ll L_t$	Propriedades refletindo o comportamento molecular $\rho, \mu, k$ , etc.	Conjunto de equações diferenciais parciais.
3	CONTÍNUO	Balanços onde: $t \gg t_t$ $L \gg L_t$	Fornecer $\rho, \mu, k$ etc., e as tensões de Reynolds, relações de transferência de calor e massa turbulenta.	Conjunto de equações diferenciais parciais.
4	COORDENADAS GENERALIZADAS	Balanços onde o volume de controle coincide com o domínio de solução em alguma direção.	Fornecer as condições de contorno nas direções onde o volume de controle coincide com o domínio de solução.	Equações diferenciais, parciais, ordinárias ou algébricas.

Onde:

$t$ : tempo médio sobre os quais os balanços de conservação são realizados

$t_m$ : tempo entre colisões moleculares

$t_t$ : escala de tempo para turbulência

$L$ : comprimento médio sobre os quais os balanços de conservação são realizados

$L_m$ : caminho livre médio entre as moléculas

$L_t$ : escala de comprimento para turbulência

Mesmo com avanços na tecnologia computacional, a solução de problemas a nível molecular (nível 1) ainda esta longe de ser conseguida. O nível seguinte (nível 2) ainda é intratável, pois as equações diferenciais precisam ser resolvidas para escalas de tempo e comprimento cujos valores encontram-se entre as escalas moleculares e turbulentas. Nos níveis seguintes, 3 e 4, é onde se acomodam hoje os modelos que resolvem os problemas de transferência de calor e massa em fluidos para problemas de interesse prático. Para tratar a turbulência nestes níveis, estão os modelos que usam equações diferenciais parciais

adicionais, o modelo  $k-\varepsilon$  e suas variações, o  $k-\omega$  e o SST (Transporte de tensão de cisalhamento).

As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia para estes níveis, no sistema cartesiano de coordenadas, escritas na forma conservativa e preparadas para receber o processo de integração do método dos volumes finitos são:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial (C_i)}{\partial t} + \frac{\partial (u_j C_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D \frac{\partial C_i}{\partial x_j} \right) + S^{C_i} \quad (3.2)$$

A Equação (3.1) representa a equação da conservação de massa total, já a Equação (3.2) mostra a conservação da massa para o componente  $i$ .

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S^{u_i} \quad (3.3)$$

A Equação (3.3) representa as equações de Navier-Stokes, onde  $u_i$  são os  $i$ -componentes de velocidade  $u, v$  e  $w$  e  $x_i$  são as  $j$ -variáveis espaciais  $x, y$  e  $z$ .

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{k_T}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S^T \quad (3.4)$$

onde  $\rho$  representa a massa específica,  $T$  a temperatura,  $C_p$  capacidade calorífica,  $k_T$  a energia cinética turbulenta,  $C_i$  a concentração do componente  $i$ ,  $P$  a pressão,  $\mu$  a viscosidade.

A Equação (3.4) representa a conservação de energia.

Nas equações (3.3) e (3.4) o primeiro termo do lado esquerdo representa o acúmulo da propriedade e o segundo termo corresponde às parcelas advectivas, de onde surgem as fortes não-linearidades destas equações. Os termos difusivos estão no lado direito das equações, sendo estes a difusividade de quantidade de movimento presente na Equação (3.3) e a difusividade térmica na Equação (3.4).

O termo  $S$  representa a geração ou consumo de cada propriedade e tem origem distinta em cada uma das equações de conservação. Nas equações de conservação de energia e conservação de massa (3.4) e (3.1) respectivamente, o termo de geração está relacionado com a geração térmica de energia e a geração de componente via reação química. Já na equação de quantidade de movimento, Equação (3.3), o termo de geração

está associado ao campo gravitacional em uma direção especificada.

### 3.4 Metodologia CFD

A variedade de programas e pacotes computacionais desenvolvidos na atualidade para resolução de uma grande quantidade de problemas da engenharia vem crescendo e, a maioria destes, apresenta diferenças, porém todos são baseados nos mesmos princípios físicos e matemáticos. A diferença entre eles está na forma de implementação numérica e o tratamento gráfico das soluções.

A resolução de um problema de CFD – *Computational Fluid Dynamics*, independente do software utilizado e consiste em três partes importantes: pré-processamento, solução numérica e pós-processamento.

#### 3.4.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento envolve a montagem e elaboração de um problema de CFD. O pré-processamento representa as fases de análise e tratamento do problema, geração da malha e especificação do escoamento (geometria) juntamente com a definição do método numérico a ser empregado e dos parâmetros necessários para a resolução. Descrevendo mais detalhadamente essas etapas, tem-se:

(a) *Análise e Tratamento do Problema*: Análise da física do problema. Nesta primeira etapa, o analista deve considerar o problema de fluxo e tentar entender quanto for possível sobre ele. Isto pode significar o envolvimento de vários profissionais de diversas áreas para o levantamento de informações importantes sobre o problema.

(b) *Geração da Malha*: Nesta etapa, o analista deve calcular a rede de pontos ou a malha que subdivide o domínio do fluxo. A série de coordenadas desses pontos na malha deve ser calculada e algumas vezes esses pontos devem estar relacionados para definir o volume e, também, as células e os elementos. Isto é definido como a distribuição dos pontos do domínio, o que garante a posição onde as variáveis são calculadas. Nem sempre malhas muito estruturadas (com muitas subdivisões) apresentam uma melhor representação do problema e uma solução mais precisa, pois estas aumentam consideravelmente o tempo de processamento. Por este motivo, a melhor opção é realizar uma análise e entendimento correto do fenômeno físico envolvido no problema, para assim, refinar a malha em pontos críticos, ou seja, de gradientes elevados, para permitir a convergência para a solução correta.

(c) *Especificação do escoamento*: A partir da existência da malha, a fronteira do domínio computacional pode ser encontrada e as condições de contorno necessárias (determinadas na primeira etapa) são aplicadas. Estas condições junto com as condições de contorno e alguns parâmetros do fluido, especificam o problema do escoamento real que deve ser resolvido.

A parte mais difícil e, conseqüentemente, mais importante do pré-processamento é a construção da geometria e a geração da malha, pois a qualidade destas está diretamente ligada à qualidade da solução e a facilidade para obtê-la.

Depois de estabelecida a geometria da malha as próximas etapas se tornam relativamente simples se o simulador apresentar uma interface gráfica adequada. As condições de contorno especificadas são visualizadas em cada parte da geometria e as propriedades dos fluidos podem ser ajustadas, porém, se estas variarem durante o processo é necessário corrigir, introduzindo uma expressão matemática para esta variação. Pode-se ajustar também a precisão, número máximo de iterações e parâmetros usados nos métodos numéricos do mesmo modo.

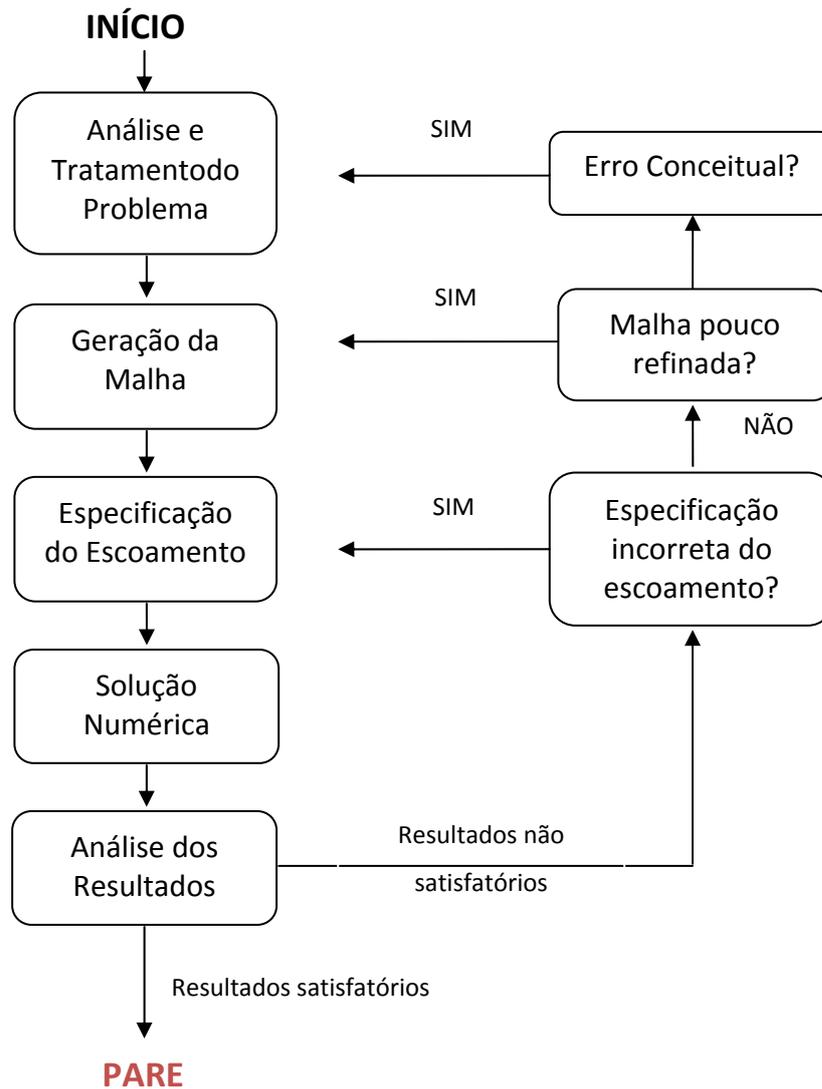
### **3.4.2 Solução Numérica**

A solução numérica ou *solver* é a etapa onde ocorrem as resoluções das equações numéricas para o problema estudado. As informações definidas na etapa de pré-processamento são importantes neste momento e devem ser utilizadas na resolução. Esta etapa é considerada o cerne de qualquer software de CFD, pois possibilita ao usuário acompanhar um pouco do seu funcionamento.

### **3.4.3 Pós-processamento**

No pós-processamento as soluções são visualizadas e interpretadas, permitindo a interação do usuário. A partir dos resultados obtidos é possível realizar os demais cálculos, além da representação de perfis destas variáveis através de gráficos e superfícies de contorno, campos vetoriais e linhas de corrente e efeitos de turbulência.

O processo de solução de um problema físico usando CFD, conforme as etapas listadas e resumidas no fluxograma apresentado na Figura 3.1 (SHAW, 1992), mostram os passos a serem seguidos para a obtenção da solução. Deve-se ressaltar que muitos problemas não são facilmente resolvidos apenas obedecendo a um conjunto de regras simples, e que muitas considerações feitas para um problema podem não ser adequadas para outro.



**Figura 3. 1:** Fluxograma representativo das etapas para resolução de problemas usando CFD (SHAW, 1992).

Na escolha de um programa de CFD deve-se levar em conta características como a geometria, tipo de escoamento e efeitos de transferência de calor, números de fases e componentes, presença de reações químicas, resultados almejados, interface, velocidade da solução, disponibilidade de *hardware*, etc.

Para se garantir, com mais segurança, a confiabilidade de um pacote computacional é importante a verificação dos resultados obtidos a partir da simulação através de procedimentos experimentais.

### 3.5 Consistência, Estabilidade e Convergência

Muitos problemas presentes na engenharia dão origem a sistemas de equações

complexos e cujos comportamentos matemáticos não se tem muito conhecimento, como é caso de quando se trabalha com sistemas de equações não-lineares. Estas, em geral, são resolvidas de forma sequencial, em que acoplamentos delicados são presentes, é muito difícil provar matematicamente que uma aproximação numérica é estável e convergente. O termo convergência é usado porque na maioria dos problemas físicos, que se deseja resolver utilizando CFD, não se tem soluções analíticas para ser comparadas com as soluções numéricas.

Um dos requisitos fundamentais de uma aproximação numérica é que ela reproduza uma equação diferencial quando os tamanhos da malha temporal e espacial (ou dos elementos de tempo e espaço) tendam a zero, ou seja, os erros de truncamento devem tender a zero quando o número de pontos da malha tender ao infinito. Quando a aproximação possuir essa característica ela é dita consistente (as equações discretizadas devem tender às equações diferenciais quando o tamanho de cada elemento da malha tender a zero). Todo modelo numérico desenvolvido a partir das equações na forma conservativa, usando volumes finitos, é consistente.

Outra característica desejada é que a solução numérica obtida seja a solução exata das equações discretizadas, ou seja, tenha estabilidade. Neste caso, muitos fatores podem interferir na estabilidade, como os erros de arredondamento de máquina, dificuldade de tratamento de acoplamentos entre as variáveis, etc. Devido ao fato da falta de conhecimento das características matemáticas das aproximações, a estabilidade se torna uma das questões mais sérias para a obtenção da solução numérica.

Consistência e estabilidade são condições necessárias e suficientes para a convergência. A solução é convergente quando é estável e tende para a solução das equações diferenciais quando a malha é refinada, ou seja, para se saber o fim da simulação, se estabelece um critério de parada. Este critério é a análise dos balanços de massa, quantidade de movimento e energia, verificando se foram obedecidos ou não ou se permanecem abaixo de um critério de erro no final da simulação.

### **3.6 Construção da Malha**

Como foi dito na seção 4 do capítulo 3, a construção da malha é uma das etapas mais importantes da simulação, pois sua característica influenciará diretamente na qualidade dos resultados e no tempo que a simulação levará, já que a solução de um sistema de equações diferenciais pode ser simplificada através do emprego de uma malha bem construída.

Todo problema de escoamento irá conter uma grande variedade de características do fluxo em seu domínio, isto é, vórtices, camadas limites, regiões de alta velocidade de escoamento e variação de pressão e ocorrência de regiões de separação, pois todas estas características devem ser consideradas na modelagem em CFD. Para realizar a modelagem onde os gradientes no espaço da variável fluxo são altos, deve-se estar consciente que estas características podem ocorrer. As regiões onde elas se formam são chamadas de regiões críticas, e nestas regiões, é necessário que se tenha um número maior de pontos na malha.

Uma malha de pontos precisa ser gerada convenientemente de forma que as equações discretizadas sejam aplicadas nestes pontos, não importa que método se utilize neste procedimento. Para isso, é necessário um bom conhecimento da geometria do problema, para que a geração da malha represente mais corretamente essa geometria. As geometrias básicas que uma malha pode ser formada são a forma bidimensional e tridimensional.

A diferença das malhas, além do tipo da geometria, está também na topologia, ou seja, a forma como a malha pode ser arranjada. Pode-se ter uma malha estruturada ou não-estruturada. Quando os volumes de controle são obtidos com uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais, diz-se que a discretização ou malha resultante é estruturada, uma vez que o volume interno tem sempre o mesmo número de pontos vizinhos, considerando, neste caso de definição, apenas aspectos geométricos da malha. A malha estruturada possui uma grade de pontos distribuída de forma regular através do domínio. A alteração do formato da geometria não altera as posições relativas dos pontos entre si, de forma que qualquer ponto na malha estará conectado aos mesmos pontos vizinhos, antes e depois da alteração da geometria.

O mais importante para o método numérico é a estrutura da matriz de coeficientes resultantes do processo de integração. As malhas estruturadas possuem a vantagem de permitir fácil ordenação e, como consequência, obter matrizes diagonais que permitem *so/vers* mais fáceis de serem desenvolvidos e mais eficientes.

Porém, os problemas reais, em função da complexidade da geometria, não permitem que malhas estruturadas possam ser empregadas em todos os casos. Para estes problemas mais complexos geometricamente, são utilizados as malhas não-estruturadas, em que os pontos não estão ligados entre si de maneira regular, desta forma alterações na geometria acarretam em alterações na conectividade dos pontos.

Devido à irregularidade das ligações e consequente liberdade de arranjo, estas malhas

são mais versáteis, se adaptam mais facilmente e são mais indicadas a discretizar geometrias irregulares com cantos e saliências. A maior dificuldade que estas malhas apresentam é na ordenação, pois dão origem a matrizes não diagonais.

Portanto, a escolha da topologia mais adequada depende apenas da natureza do problema. Em geral, códigos de programação, escritos com base em malhas estruturadas, levam a programas mais eficientes, pois a regra de ordenação dos pontos e células é facilitada.

É possível, também, modificar a malha com o objetivo de obter uma solução mais confiável ou refinar a malha em regiões onde apresentam altos gradientes das variáveis.

### 3.7 Turbulência

A turbulência consiste em flutuações de fluxo no tempo e no espaço. É um processo complexo, principalmente porque é tridimensional, instável e consiste de muitas escalas. Esta multiplicidade de escalas é uma das características mais importantes dos escoamentos turbulentos, como nas maiores estruturas (baixas frequências), controladas pela geometria que as geram, até as menores estruturas (altas frequências) as quais são controladas pela viscosidade do fluido, podendo ter um efeito significativo sobre as características do fluxo.

O regime turbulento é predominante nos escoamentos, devido às pequenas perturbações injetadas nos mesmos as quais são naturalmente amplificadas, gerando instabilidades que conduzem à transição. A turbulência ocorre quando as forças de inércia tornam-se significativas em comparação com forças viscosas, e é caracterizada por um número de Reynolds elevado.

#### 3.7.1 Escalas de turbulência

Em escoamentos existem diversas escalas de comprimento, relacionadas às dimensões do canal de escoamento e à influência da viscosidade. Um escoamento em placa plana, por exemplo, apresenta, nas proximidades da parede, uma igualdade de grandeza entre as forças viscosas e as forças inerciais. Desta forma, é possível, escolher um novo comprimento  $l$  que obedeça a relação entre as grandezas, pela Equação (3.5).

$$\frac{\rho U^2}{L} = \frac{\mu U}{l^2} \quad (3.5)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica,  $U$  é a velocidade da corrente livre,  $L$  é o comprimento da placa,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica e  $l$ , o comprimento que representa a escala.

As maiores escalas são representadas pela dimensão  $L$ , que limitam o tamanho do duto, e pela velocidade característica,  $U$ , sendo que as maiores escalas de comprimento são relacionadas com os maiores vórtices, e as menores escalas, aos menores vórtices, uma vez que os termos viscosos atuam no sentido de limitar o surgimento de vórtices ainda menores através da dissipação de energia na forma de calor. Segundo a “Hipótese do Equilíbrio Universal” de Kolmogorov, a qual postula que os únicos parâmetros importantes para o movimento de pequenas escalas são a taxa de dissipação de energia  $\varepsilon$  e a viscosidade cinemática  $\nu$  (KOLMOGOROV, 1942 *apud* FREIRE *et al.*, 2002), tem-se que as escalas de turbulência de Kolmogorov podem ser expressas pelas equações (3.6), (3.7) e (3.8).

$$l_d = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \quad (3.6)$$

$$\tau = \left(\frac{\nu}{\varepsilon}\right)^{1/2} \quad (3.7)$$

$$u = (\nu\varepsilon)^{1/4} \quad (3.8)$$

Onde  $l_d$  é a escala de comprimento,  $\tau$  é a escala de tempo e  $u$  a escala de velocidade. Com base nestas equações, obtém-se o número de Reynolds baseado nas escalas se comprimento e velocidade, apresentado na Equação (3.9).

$$Re = \frac{ul_d}{\nu} \quad (3.9)$$

A taxa de dissipação de energia para as grandes escalas é proporcional a  $U^2$ , sem a participação da viscosidade, como apresentado a seguir na Equação (3.10).

$$\varepsilon \approx \frac{U^2}{t} = \frac{U^3}{L} \quad (3.10)$$

Usando a relação (3.10) acima nas expressões de Kolmogorov (3.6), (3.7), (3.8), para os movimentos de pequenas escalas tem-se:

$$\frac{l_d}{L} = \left(\frac{UL}{\nu}\right)^{-3/4} = Re^{-3/4} \quad (3.11)$$

$$\frac{\tau}{t} = \frac{\tau U}{L} = \left(\frac{UL}{\nu}\right)^{-1/2} = Re^{-1/2} \quad (3.12)$$

$$\frac{\nu}{U} = \left(\frac{UL}{\nu}\right)^{-1/4} = Re^{-1/4} \quad (3.13)$$

Pode-se observar que as escalas de comprimento, tempo e velocidade dos menores vórtices são muito menores que as dos maiores vórtices e que esta diferença aumenta com o aumento do número de Reynolds. A vorticidade, por sua vez, possui dimensões de frequência ( $s^{-1}$ ), logo, esta característica, em relação aos menores vórtices, deve ser proporcional ao inverso da escala de tempo  $\tau$ . Conclui-se, assim, que a vorticidade dos menores vórtices é muito maior que a dos maiores vórtices. Por outro lado, a relação  $\nu/U$  mostra que a energia dos menores vórtices é bem menor que a energia contida nos vórtices de grandes escalas. Desta forma, em um escoamento turbulento a maior parte da energia está associada ao movimento de grandes escalas.

A partir desta relação também é possível estimar o número de graus de liberdade por unidade de volume:

$$N = \left(\frac{L}{l_d}\right)^3 = Re_L^{9/4} \quad (3.14)$$

onde  $N$  é o número de graus de liberdade por volume. Para alguns escoamentos, com número de Reynolds elevados, não é possível utilizar, em suas simulações, as equações de Navier-Stokes, devido ao elevado número de graus de liberdade que estas apresentam. Por este motivo, se fazem necessárias equações adicionais, provenientes de modelos de turbulência, que possibilitem a modelagem destes escoamentos.

### 3.7.2 Modelos de Turbulência

Em princípio, as equações de Navier-Stokes podem descrever qualquer tipo de fluxo tanto laminar quanto turbulento sem a necessidade de informações adicionais. Se a malha for suficientemente fina, todas as escalas de todos os fenômenos físicos envolvidos serão abrangidas pelas equações discretizadas. Este tipo de abordagem é chamado de Simulação Numérica Direta (SND). Entretanto, este método só pode ser aplicado para valores de Reynolds muito baixos, dentro dos limites do escoamento laminar, devido ao baixo número de graus de liberdade, conforme indicado pela Equação (3.14).

Como comentado anteriormente, para números de Reynolds elevados, foram desenvolvidos modelos de turbulência na tentativa de solucionar o problema relativo aos altos graus de liberdade e do elevado número de subdivisões da malha, já que, a Simulação

Numérica Direta destes escoamentos exigiria um poder computacional ainda não alcançado.

Alguns desses modelos desenvolvidos têm aplicações muito específicas, enquanto outros podem ser aplicados a uma classe mais ampla de fluxos com um grau razoável de confiança. Os modelos podem ser classificados em dois grandes grupos: modelos de Viscosidade Turbulenta e modelo de Tensões de Reynolds. Os modelos de turbulência presentes no ANSYS® CFX 11.0 são mostrados na Tabela 3.2.

**Tabela 3. 2:** Classificação dos modelos de turbulência (ANSYS® CFX 11.0).

MODELO		ABORDAGEM
<b>VISCOSIDADE TURBULENTA</b>	Modelo com zero equações	Usado para "chutes" iniciais para simulações
	Modelo de uma equação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• k-epsilon 1E ((k-ε)<sub>1E</sub>)</li> <li>• Baixo número de Reynolds</li> </ul>
	Modelo de duas equações	<ul style="list-style-type: none"> <li>• k-epsilon</li> <li>• RNG k-epsilon</li> <li>• k-omega</li> <li>• BSL k-omega</li> <li>• SST (Shear Stress Transport)</li> </ul>
<b>TENSÕES DE REYNOLDS</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tensões de Reynolds Omega</li> <li>• Tensões de Reynolds BSL</li> </ul>

Outra técnica similar é a simulação em Grandes Escalas (*Large Eddy Simulation* - LES), na qual as discretizações temporais e espaciais são aplicadas somente aos maiores vórtices, reduzindo o esforço computacional. As escalas pequenas de tempo e comprimento, as quais estão associadas aos maiores vórtices, são aproximadas pela introdução de modelos algébricos simples. Apesar de reduzir, consideravelmente, os recursos computacionais necessários durante a simulação, esse tipo de abordagem ainda é inviável para a maioria dos escoamentos, sendo aplicável de preferência somente para números de Reynolds menores que 5000 (FREIRE, 2002; ANSYS® CFX 11.0)

Embora informações sobre as menores escalas do escoamento turbulento sejam relevantes, em muitas situações é suficiente uma descrição do escoamento médio. Partindo desse pressuposto, qualquer propriedade do escoamento pode ser expressa através de

uma quantidade média e de outra de flutuação associada à turbulência, como por exemplo, um componente de velocidade pode ser dividido em um componente médio e um, variável no tempo (ANSYS® CFX 11.0).

Em geral, os modelos de turbulência visam modificar as equações de Navier-Stokes originais através da introdução destas variáveis médias e flutuantes no tempo. Os termos remanescentes são as tensões de Reynolds, que nada mais são do que o produto das médias das flutuações das componentes de velocidade. Porém neste novo sistema de equações surgem novas incógnitas, tais como correlações triplas de flutuações de velocidades e outras envolvendo flutuações de pressão. Novas equações para estas correlações representam o surgimento de outras de ordem ainda superior e um aumento considerável no número de equações diferenciais. Estes fatos desencadeiam o aparecimento do chamado problema de "fechamento": são necessárias mais equações para a modelagem destes termos adicionais, de forma que o número de equações permaneça igual ao número de incógnitas. As equações usadas para "fechar" o sistema definem o tipo de modelo de turbulência. Conforme apresentado na Tabela 3.2, isso pode ser feito usando tanto o conceito de viscosidade turbulenta, quanto equações de transporte para as tensões de Reynolds (ANSYS® CFX 11.0).

#### **(a) Modelo de Viscosidade Turbulenta**

O conceito de viscosidade turbulenta sugere que na região de turbulência pequenos vórtices estão continuamente se formando e se dissipando. Nestas regiões as tensões de Reynolds são assumidas como proporcionais à média dos gradientes de velocidade, o que define o Modelo de Viscosidade Turbulenta. Nesta região também acontece a variação da viscosidade do fluido, sendo o novo valor de viscosidade uma consequência das flutuações de velocidade. A viscosidade turbulenta não é uma propriedade física do fluido como a viscosidade clássica, mas está relacionada à medida local do nível de turbulência.

Dentro do modelo de viscosidade turbulenta, os modelos de uma equação envolvem o cálculo da viscosidade turbulenta como proporcional à velocidade média e a uma escala de comprimento, sem o envolvimento de equações de transporte. Já os modelos de duas equações são mais comumente usados e envolvem o cálculo de dois fatores: a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação.

Dentre esses modelos existentes, o modelo  $k$ -epsilon ( $k$ - $\epsilon$ ) é um dos mais utilizados. Ele é considerado um dos modelos de turbulência mais comumente usado, e tem sido implementado na maioria dos códigos CFD para propósitos em geral e é considerado o

modelo padrão da indústria. O modelo  $k$ -epsilon mostrou ser estável e numericamente robusto, além de possuir um regime com capacidade de previsão bem estabelecida. Para simulações de uso geral, o modelo oferece bom compromisso em termos de precisão e robustez.

Neste modelo,  $k_T$  é a energia cinética turbulenta que corresponde à variância das flutuações de velocidade e  $\varepsilon$  é a taxa na qual a energia é dissipada. As Equações (3.15) e (3.16), a seguir, representam o transporte para  $k_T$  e  $\varepsilon$ , respectivamente (ANSYS® CFX 11.0):

$$\frac{\partial(\rho k_T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k_T) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k_T}} \right) \nabla k_T \right] + P_{k_T} - \rho \varepsilon \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_{k_T} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.16)$$

Onde  $U$  é o vetor velocidade,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são constantes adimensionais do modelo,  $\mu_t$  representa a viscosidade turbulenta, e o termo  $P_k$ , a turbulência gerada pelas forças viscosas e de campo, que são dadas por:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k_T^2}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

$$P_{k_T} = \mu_t \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^t) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U (3\mu_t \nabla \cdot U + \rho k_T) + P_{kb} \quad (3.18)$$

onde  $C_\mu$  é uma constante adimensional.

Para escoamentos incompressíveis,  $\nabla \cdot U$  é baixo, e o segundo termo do lado direito da Equação (3.18) acima, não contribui significativamente para a geração de turbulência pelas forças viscosas. Para escoamentos compressíveis,  $\nabla \cdot U$  é alto somente em regiões com divergência de alta velocidade, como os choques.

Na Equação (3.18), o segundo termo representa a contribuição das forças viscosas e o último termo,  $P_{kb}$ , representa a contribuição da força de campo para a produção de turbulência, que está apresentada a seguir pela Equação (3.19):

$$P_{kb} = - \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} g \cdot \nabla \rho \quad (3.19)$$

onde  $g$  é a aceleração gravitacional e  $Pr_t$  é o número de Prandtl turbulento.

Em algumas situações comuns de escoamento o modelo  $k$ - $\varepsilon$  apresenta deficiências

significativas. Algumas dessas situações são:

- Escoamento na presença de curvatura de linhas de corrente;
- Escoamento sob ação de gradientes de pressão adversos;
- Escoamento em regiões de separação;
- Jatos;
- Escoamentos sob ação de campos de força.

Atualmente, os mais proeminentes modelos de duas equações são: o modelo  $k-\omega$  ( $k$ - $\omega$ ) baseados nos modelos de MENTER (1993) e o Modelo das Tensões de Reynolds. Estes modelos foram desenvolvidos para aumentar a precisão da predição do início e da quantidade de separação do fluxo em condições adversas de gradiente de pressão, através da inclusão de efeitos de transporte na formulação da viscosidade turbulenta.

Uma das vantagens da formulação de  $k-\omega$  é o tratamento próximo à parede para cálculos com baixos números de Reynolds. Além disso, o modelo  $k-\omega$  não envolve o amortecimento de funções não-lineares complexas, necessário para o modelo  $k-\varepsilon$ , sendo, portanto, um modelo mais preciso e robusto. O comportamento de convergência do modelo de  $k-\omega$  é, muitas vezes, semelhante ao do modelo  $k-\varepsilon$ . Como os modelos zonais de  $k-\omega$  incluem funções de mistura nas regiões próximas à parede, que são uma função da distância da mesma, uma equação adicional é resolvida para calcular a distância da parede no início das simulações (primeiras iterações). Estas iterações são feitas automaticamente pelo Solver ANSYS® CFX.

O modelo  $k-\omega$  assume que a viscosidade turbulenta está ligada à energia cinética turbulenta e a frequência turbulenta através da relação apresentada na Equação (3.20).

$$\mu_t = \rho \frac{k_T}{\omega} \quad (3.20)$$

O ponto de partida da formulação atual é o modelo  $k-\omega$  desenvolvido por Wilcox. Ele resolve duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta e uma para a frequência de turbulência. O tensor de tensão é calculado a partir da equação da viscosidade de Foucault. A energia cinética turbulenta  $k$  é dada pela Equação (3.21):

$$\frac{\partial(\rho k_T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k_T) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k_T \right] + P_{k_T} - \beta' \rho k_T \omega \quad (3.21)$$

E a frequência turbulenta  $\omega$  é dada pela Equação (3.22):

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 \quad (3.22)$$

Além das variáveis independentes, a densidade,  $\rho$ , e o vetor velocidade,  $U$ , são tratados como quantidades conhecidas pelo método de Navier-Stokes.  $P_k$  é a taxa de produção de turbulência que é calculada como no modelo  $k-\varepsilon$  na Equação (3.18). As constantes do modelo são dadas por:

$$\beta' = 0,09 \quad (3.23)$$

$$\alpha = 5 / 9 \quad (3.24)$$

$$\beta = 0,075 \quad (3.25)$$

$$\sigma_k = 2 \quad (3.26)$$

$$\sigma_\omega = 2 \quad (3.27)$$

O tensor de Reynolds desconhecido é calculado a partir de:

$$\tau = \mu_t 2s - \rho \frac{2}{3} \delta k \quad (3.28)$$

### **(b) Modelo das Tensões de Reynolds**

Os modelos baseados no conceito de viscosidade turbulenta fornecem resultados satisfatórios para escoamentos turbulentos bidimensionais sobre superfícies planas, mas não são capazes de prever corretamente os efeitos da curvatura de linhas de corrente sobre o escoamento. Além dessa limitação, existe outra relativa a avaliação das tensões normais de Reynolds, de grande importância em escoamentos com separação. Como alternativa para solução desse problema é a obtenção das tensões de Reynolds diretamente de suas equações de transporte (DESCHAMPS, 2002).

O modelo das Tensões de Reynolds baseia-se em equações de transporte para todas as tensões, mas estas equações não são provenientes da hipótese de viscosidade turbulenta, mas sim da resolução de cada tensão individual, seja por meio de equações algébricas ou diferenciais. Esses modelos são caracterizados por um maior grau de universalidade.

A penalidade para essa flexibilidade é um alto grau de complexidade no sistema matemático resultante, pois um aumento do número de equações de transporte leva a uma redução da robustez numérica, e, muitas vezes, exige um maior esforço computacional, que impede sua utilização em fluxos complexos. O desenvolvimento matemático das tensões é detalhadamente discutido por SCHLICHTING (1979).

Deve-se considerar o uso do modelo das Tensões de Reynolds nos seguintes tipos de fluxo:

- Fluxos de cisalhamento livre com anisotropia forte, como um componente de turbulência forte. Inclui fluxos de fluidos em rotação;
- Fluxos com mudanças bruscas da taxa de deformação média;
- Fluxos em que os campos de tensão são complexos, e reproduzem a natureza anisotrópica da turbulência;
- Fluxos com forte dinâmica de curvatura;
- Fluxos secundários;
- Fluxos flutuantes.

### **3.8 Aplicações de CFD em Processos de Filtração de Gases**

A maioria dos trabalhos publicados na área de limpeza e filtração de gases são estudos experimentais, porém alguns pesquisadores têm utilizado a ferramenta computacional para comparar com dados obtidos experimentalmente, ou para obtenção de resultados preliminares para futuros trabalhos.

A utilização da simulação computacional tem como principal aplicação, nesta área, a investigação da influência da velocidade de filtração e da máxima queda de pressão no leito. Esta aplicação pode ser vista na maioria dos estudos para diferentes tipos de filtros com limpeza de gases, como feito por DITTLER e KASPER (1999), que em seu trabalho utilizaram um modelo bidimensional em regime semi-estacionário para prever a queda de pressão como uma função da eficiência de regeneração e dos padrões de regeneração de filtros cerâmicos. Foram levadas em consideração neste modelo a espessura e a resistência do fluxo ao próprio meio. Os resultados comprovaram que a queda de pressão aumenta mais rapidamente e que os ciclos de operação se tornam mais curtos para os casos de baixa eficiência de regeneração. Também pode ser observado neste trabalho, que o padrão de regeneração só influencia a curva de queda de pressão no início do ciclo de filtração, mas não influencia nos tempos dos ciclos de filtração.

Na limpeza de gases quentes as velas cerâmicas são amplamente utilizadas, devido a resistência dos materiais à altas temperaturas. TANTHAPANICHAKOON *et al.* (2008) utilizando como ferramenta computacional o *software* FLUENT, investigaram a remoção de partículas pequenas em gases de exaustão a altas temperaturas. O CFD foi a técnica utilizada para um estudo anterior a fase experimental, com objetivo de analisar as condições

de processo, redução de custos e obtenção de resultados rápidos. Foi observado o comportamento dinâmico do fluxo de gás na vela em estudo, a distribuição de velocidade na superfície desta, formação da torta e pulso de limpeza. Em comparação com dados experimentais obtidos, o resultado da simulação para a formação da torta sobre a vela cerâmica apresentou alguma discordância. Ao invés de ser uniforme, como ocorreu no experimento, a formação da torta na simulação apresentou regiões com diferentes espessuras.

Outro estudo computacional em filtros cerâmicos, porém para retenção de particulados oriundos da queima do diesel, chamado de DPF (*Diesel Fuel Particulate*), foi realizado por DEUSCHLE *et al.* (2008). Neste trabalho, os autores apresentam uma validação experimental de um modelo CFD que descreve os efeitos da regeneração, filtração e depósitos neste sistema de filtro. Um código comercial de CFD (FLUENT 4TM) foi expandido utilizando um programa de rotinas desenvolvidas com a linguagem de programação, compatível com o código de CFD FORTRAN. O modelo de CFD utilizado mostrou-se eficiente para o modelo de bancada utilizado, e também, para a investigação em longo prazo de um sistema de filtro de gás de diferentes geometrias.

No trabalho realizado por LI *et al.* (2007), o objetivo era estudar a evolução da velocidade do gás e da temperatura em um vaso-filtro, contendo três velas cerâmicas, durante um processo de filtração, em estado estacionário. Além disso, foram avaliados também, os perfis de temperatura na cavidade da vela cerâmica durante o processo de limpeza (pulso). Para este estudo foi feita a simulação deste processo utilizando o *software* FLUENT com o modelo de turbulência das tensões de Reynolds. Os resultados provenientes da simulação da filtração, em estado estacionário, mostraram um fluxo de gás bastante razoável no vaso de filtro e demonstraram que o modelo adotado no estudo é aplicável. Os resultados das simulações apresentaram concordância qualitativa com os obtidos experimentalmente.

Outro tipo de filtro utilizado na limpeza de gases quentes e na remoção de particulado são os filtros granulares. A aplicação da fluidodinâmica computacional se enquadra, principalmente no estudo do fluxo de gás, cálculo de perda de carga, eficiência de coleta entre outros. Os estudos computacionais com estes tipos de filtro ainda não são tão numerosos quanto para filtros cerâmicos. Aparecem em maior quantidade os trabalhos experimentais, caracterizados pelas etapas mais complexas de montagem e obtenção de resultados.

Os filtros granulares de leito móvel, ainda apresentam grandes desafios em seus

estudos, por isso a simulação entra como aliada nestes trabalhos, como é o caso do ZHAO *et al.* (2008). Neste trabalho foi estudado um filtro de leito móvel granular para a remoção de particulado e dessulfurização do gás quente oriundo da queima do carvão na geração de energia. Foi utilizado um fluxo transversal ao leito e foi realizada a otimização do processo. Para isso, simulou-se este processo combinado (remoção de partículas e dessulfurização), a partir de um modelo matemático desenvolvido utilizando as equações de cada operação unitária como base. Os resultados da simulação mostraram que o processo combinado tem vantagens na eficiência de dessulfurização e na conversão de adsorventes em comparação com a operação individual, devido a influência que o depósito de partículas pode causar sobre o fluxo de gás no leito.

Os filtros de leito fixo também são empregados na retenção de material particulado. REDDY e JOSHI (2008) estudaram a queda de pressão e coeficiente de atrito em leitos fixos e expandidos utilizando o software FLUENT 6.2. A simulação foi realizada tanto para leito fixo quanto para leito expandido, em regime laminar, transiente e turbulento (Reynolds entre 0,1-10.000). As variáveis de interesse foram a velocidade média, a pressão e as características de turbulência. Para comparação dos resultados foram utilizados valores do coeficiente de atrito obtidos a partir da equação de Ergun. Os valores do coeficiente de atrito preditos ficaram dentro do esperado para escoamentos laminares, porém no regime de escoamento turbulento a diferença entre os valores foi de 10-25%. Algumas diferenças também apareceram na comparação dos valores do coeficiente de atrito da simulação com os da equação de Ergun. Estas diferenças estão relacionadas com o fluxo na simulação.

Um estudo computacional com um modelo de filtro em leito fixo em escala piloto foi realizado por PORCIÚNCULA *et al.* (2010). Neste trabalho foram feitas diferentes simulações, em estado estacionário, para condições de operação distintas com objetivo de avaliar a mínima perda de carga inicial, utilizando o software comercial ANSYS CFX. No estado transiente, os autores avaliaram o aumento da perda de carga com o tempo, sob diferentes abordagens matemáticas, concluindo que o aumento pode chegar até quatro vezes o valor da carga inicial.

# Capítulo 4

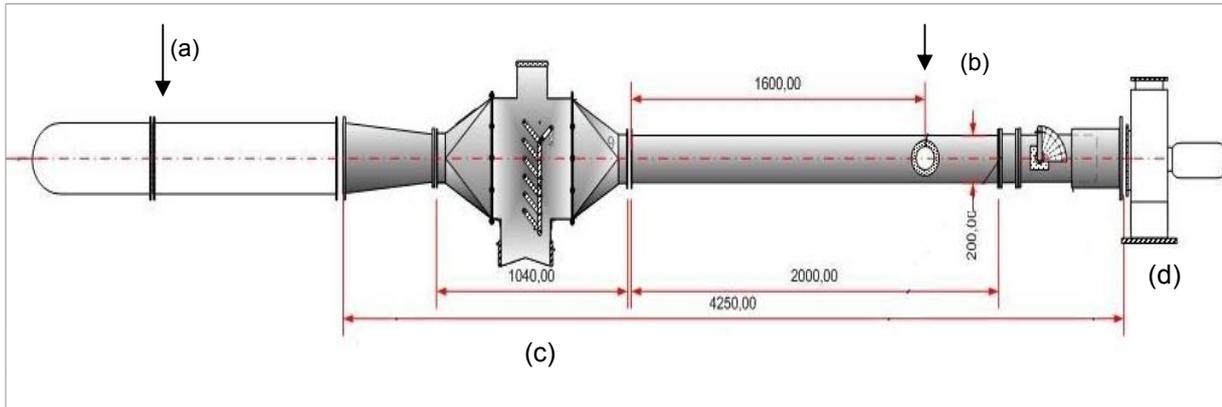
## Apresentação do Problema

*Neste capítulo serão apresentadas: a geometria do problema utilizado na simulação, as condições empregadas na simulação, as condições de contorno e de entrada e as características da malha utilizada. Serão apresentadas também as velocidades de trabalho escolhidas, com base nas restrições da bancada. Os resultados desta fase do trabalho serão posteriormente comparados com resultados experimentais realizados na bancada.*

### 4.1 Geometria do Problema

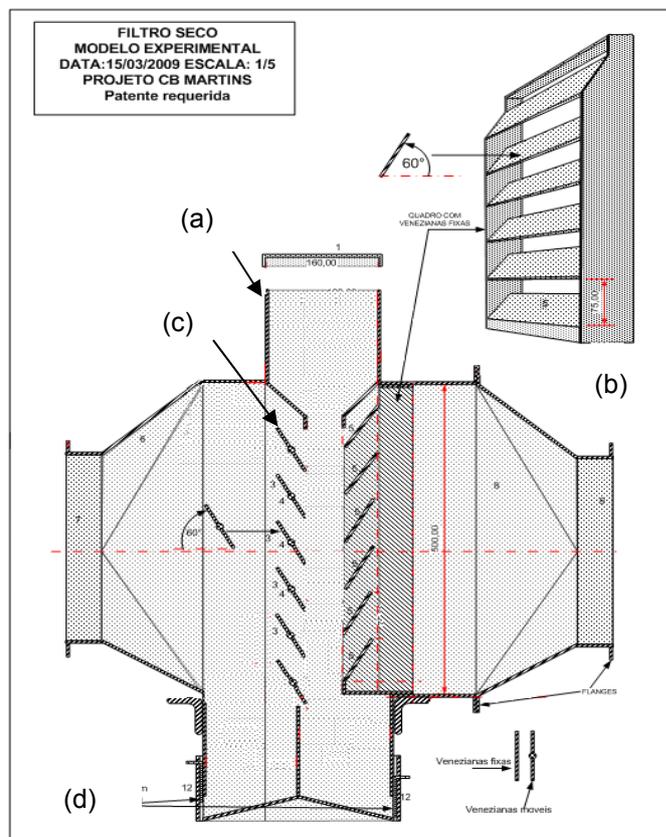
O projeto que engloba este trabalho tem como proposta o projeto, a montagem e a operação de um sistema de remoção de material particulado, proveniente da combustão de carvões minerais brasileiros. Dentro desta proposta, optou-se por avaliar a eficiência dos filtros granulares na remoção à seco de particulados oriundos da queima do carvão (cinzas volantes).

Na primeira etapa deste trabalho foi feito o projeto de um filtro granular, em escala de bancada, operando a temperatura ambiente. O sistema composto pelo filtro granular, ventilador, tubulações, pontos de amostragem de gases e de material particulado está representado na Figura 4.1 e o interior do filtro detalhado na Figura 4.2.



**Figura 4. 1:** Sistema completo: filtro, tubulações e ventilador (Patente Prof. Celso Martins).

Neste sistema o ar entra pela tubulação no lado esquerdo da Figura 4.1, enquanto que o material particulado é injetado na linha, mais a frente, através de um tubo, localizado no ponto (a). Ao entrarem no filtro (c) pelo bocal esquerdo, atravessam o meio filtrante granular, composto de esferas de vidro, e saem pela tubulação no lado direito. O bocal para amostragem fica distante da saída do mesmo cerca de 1 metro e 60 centímetros, indicado pelo ponto (b). O ventilador (d) está acoplado a um inversor de frequência, que possibilita a variação e controle da vazão do ar, através do controle da frequência do mesmo.

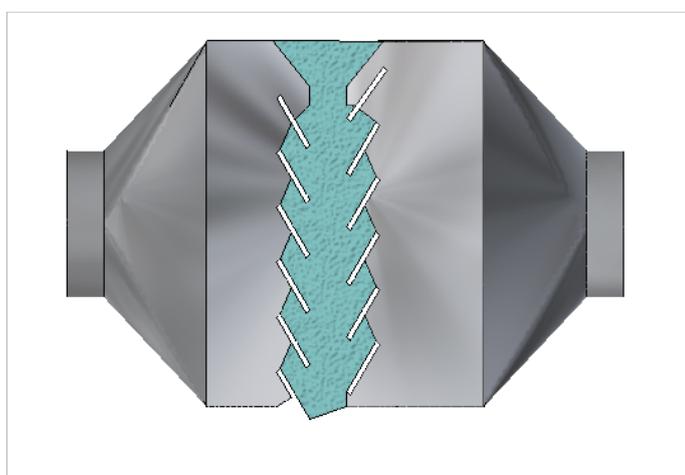


**Figura 4. 2:** Detalhe interno do filtro estudado e calhas que retêm o meio filtrante.

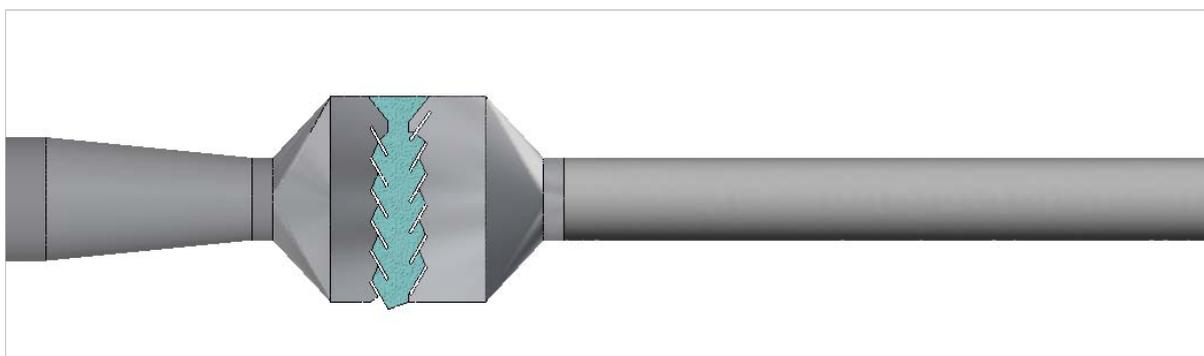
O interior do filtro, detalhado na Figura 4.2, apresenta o bocal superior (a) para a

alimentação do meio filtrante, distribuído entre as calhas (b) e (c), podendo ser retirado, quando saturado, pelo fundo através das aberturas laterais (d). As calhas do lado direito (b) são fixas, enquanto que as do lado esquerdo (c) são móveis, permitindo a variação do ângulo de repouso do meio filtrante, aumentando a espessura do leito e facilitando a retirada da torta formada do lado esquerdo do filtro, quando necessário.

A geometria do modelo proposto foi recriada, utilizando o software ANSYS® ICEM, para a geração da malha para posterior simulação computacional. A vista lateral da geometria para este modelo de filtro aparece na Figura 4.3 e o sistema completo na Figura 4.4.



**Figura 4. 3:** Vista lateral do filtro já com o recheio.



**Figura 4. 4:** Vista lateral do filtro e suas tubulações a jusante a montante.

Nos limites das tubulações a jusante e a montante do filtro se localizam os pontos de tomada de pressão para o cálculo da perda de carga ( $\Delta P$ ), motivo este, que as incluiu na geometria que daria origem a malha para a simulação numérica. Estes pontos estão dispostos três diâmetros à montante e 8 à jusante do filtro, conforme define a Norma da ABNT, para pontos de amostragem em dutos e chaminés (NBR 10701, 1989).

Devido à configuração da bancada já existente, a tubulação anterior ao filtro apresenta

uma redução de diâmetro, para se adequar ao diâmetro da entrada do filtro, como se observa na Figura 4.4. Para assegurar que neste intervalo da tubulação não houvesse uma perda de carga significativa, foi realizado um teste preliminar na bancada, para intervalo de velocidades de interesse. Essa hipótese foi descartada, pois o valor de  $\Delta P$  encontrado no teste foi praticamente nulo para o intervalo de velocidades aplicado.

A principal simplificação feita na geometria original do projeto foi desconsiderar o bocal superior de alimentação e a parte inferior com as aberturas laterais (onde é feita a retirada do meio filtrante) na geometria utilizada na simulação, Figuras 4.3 e 4.4. Essas alterações foram feitas, pois se percebeu, através de simulações preliminares - utilizando a geometria completa, que o fluxo de gás não atravessava o leito nestes pontos, devido a barreiras físicas. Além disso, a presença desses pontos na geometria do filtro aumentaria consideravelmente o tamanho da malha e, conseqüentemente, o tempo computacional.

## 4.2 Especificações do Problema

As condições de operação consideradas nas simulações, baseadas nas condições reais que se teria durante os testes de bancada, são as seguintes:

- Regime de escoamento: estado estacionário;
- Temperatura média de operação: 25°C;
- Porosidade do meio filtrante ( $\epsilon$ ): 0,4;
- Esfericidade (meio filtrante) ( $\phi$ ): 1 ;
- Diâmetro médio das esferas do meio filtrante ( $d_p$ ): 1 mm;
- Ângulo das Calhas que suportam o leito: 60°;
- Velocidades do ar na entrada do leito:  
 $u_1 = 0,2$ ;  $u_2 = 0,3$ ;  $u_3 = 0,4$  e  $u_4 = 0,5 \text{ m.s}^{-1}$ ;
- Alimentação de particulados: nenhuma.

Os valores de velocidades do ar foram determinados com base no intervalo de interesse de operação do filtro, ou seja, 0,2 a 1  $\text{m.s}^{-1}$  e através de procedimentos experimentais feitos na bancada. Para que se conhecesse o limite superior de operação do filtro, observou-se qual seria a máxima frequência do ventilador que o leito suportaria antes do seu escoamento e/ou fluidização, fator esse que acarretaria em erros nos resultados de perda de carga dos experimentos. Este fenômeno foi observado para operações com frequências do ventilador superiores a 25 Hz.

Levando em conta esse limite de operação, escolheram-se quatro frequências de trabalho: 10, 15, 20 e 25 Hz. Através do controle da potência do ventilador (realizado pelo inversor de frequências conectado a este) e de procedimentos experimentais (detalhado no Capítulo 5), foi possível obter um valor de velocidade para cada uma das frequências de trabalho ajustadas no inversor do ventilador. Esses valores foram utilizados nos cálculos dos experimentos e nas simulações. O detalhamento desses procedimentos e cálculos serão apresentados e esclarecidos no decorrer do trabalho.

Para esta dissertação, tanto para os procedimentos computacionais, quanto para os experimentais, considerou-se apenas ar na entrada do filtro.

#### 4.2.1 Condições de Contorno Aplicadas ao Problema

Para a simulação deste problema optou-se por utilizar como domínio o conjunto, filtro e tubulações, e como subdomínio, o leito. No domínio, definido como domínio fluido, aplicou-se:

- Condições de escoamento: estado estacionário;
- Fluido: ar a 25°C;
- Pressão de referência: 1atm;
- Modelo para o fluido: sem troca térmica;
- Modelo de turbulência: k-omega ( $\kappa\text{-}\omega$ );
- Critério de convergência (soma dos resíduos normalizados) para todas as equações:  $5 \times 10^{-5}$ .

Como o leito é um meio poroso, se torna necessária a definição de uma "fonte" (*Source*), que definirá o processo físico para o subdomínio. Neste problema, o tipo de fonte empregada é do tipo Fonte de Momento (*Momentum Source*), especificadamente do tipo Modelo de Perda Isotrópico (*Isotropic loss model*) (ANSYS<sup>®</sup> CFX 11.0). Este modelo pode ser especificado usando tanto coeficientes de resistência quadráticos ou lineares ou, também, usando a permeabilidade e o coeficiente de perda, especificado pela generalização da lei de Darcy. Este modelo é apropriado para regiões de poros isotrópicos.

O escoamento em meios porosos no *solver* ANSYS<sup>®</sup> CFX pode ser calculado tanto pelo modelo para a perda de momento ou pelo modelo totalmente poroso. O modelo poroso é ao mesmo tempo, uma generalização das equações de Navier-Stokes e da Lei de Darcy, comumente usado para escoamentos em regiões porosas. Ele pode ser empregado para modelos de escoamentos onde a geometria é muito complexa para ser resolvida com uma malha. O modelo mantém tanto os termos de advecção como os de difusão e pode,

portanto, ser usado para fluxos em hastes ou feixe de tubos, onde tais efeitos são importantes.

O modelo generalizado da Lei de Darcy para escoamentos em meios porosos, utilizado pelo CFX, é dado pela Equação (4.1):

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{k} U_i + K_{Perda} \rho |U| U_i \quad (4.1)$$

onde  $k$  é a permeabilidade do meio filtrante e  $K_{Perda}$  é um coeficiente de perda de carga, o qual foi desconsiderado para este sistema.

Neste trabalho, utilizaram-se dois valores de permeabilidade hidráulica, um teórico e outro experimental. O valor de permeabilidade teórico ( $k_{teórico}$ ) foi calculado, em um primeiro momento, utilizando a equação de Blake-Kozeny (2.6) com base na geometria de filtração (BERKER, 1963 apud MASSARANI, 2002). Para isso, o fator de forma  $\beta$  também foi calculado utilizando as equações (2.7), (2.8) e (2.9). Estas equações foram desenvolvidas por BERKER para uma seção transversal retangular, mais próxima da geometria da seção de filtração do filtro.

Num segundo momento, após os testes experimentais na bancada, foi possível calcular o valor da permeabilidade experimental, utilizando os valores de vazão e perda de carga, obtidos experimentalmente. Este valor de  $\kappa$  foi utilizado nas simulações seguintes e comparado com os resultados anteriores.

O modelo de turbulência empregado às equações governantes, Navier-Stokes e continuidade, foi o modelo  $k-\omega$ , devido as suas características já apresentadas no Capítulo 3 dessa dissertação, como: tratamento próximo à parede para sistemas com baixos números de Reynolds, maior precisão e robustez. A intensidade da turbulência na entrada foi definida como média (5%), valor recomendado quando não se possui uma ideia clara da intensidade real da turbulência para o sistema. Condições de contorno de parede foram aplicadas nas demais superfícies do domínio (que não a entrada ou saída), como condições de "não deslizamento" (*no slip*), ou seja, o valor da velocidade do fluido, quando este está em contato com a parede, assume a velocidade da parede, neste caso, zero. Para as superfícies do leito que não estavam em contato com as calhas (venezianas), foi aplicada a condição de interface, pois estas são regiões que estão em contato com o subdomínio poroso e com o domínio fluido.

Na entrada também foram definidas a velocidade de entrada do ar, como apresentado anteriormente, e o regime de escoamento como subsônico, que não obriga a especificação

de todas as variáveis na entrada. Na saída, com escoamento também subsônico, optou-se por definir apenas a pressão estática como nula (0 Pa).

Com estes dados definidos realizou-se o teste de malhas para este problema, como será explicado no item seguinte.

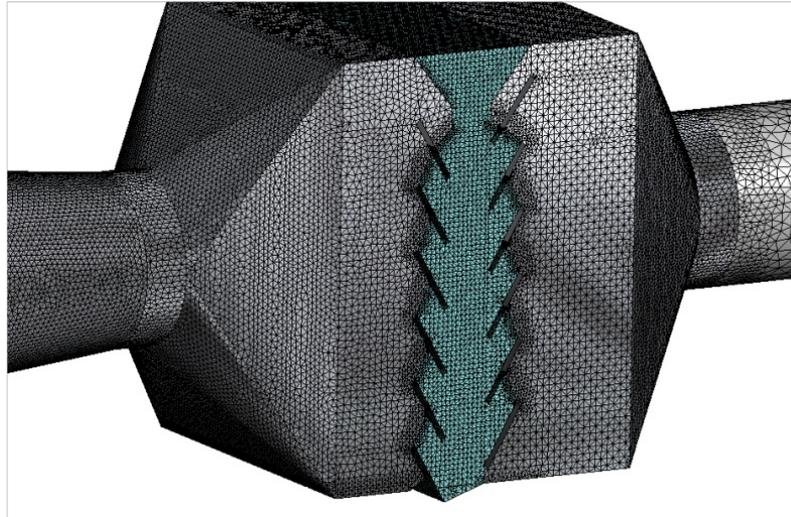
### 4.3 Teste de Malha

Para a geometria apresentada na Figura 4.5 foram realizados três testes de malha, considerando apenas ar na entrada a uma temperatura a 25°C com velocidade intermediária. Foram avaliados 3 tipos de malhas com diferentes tipos de refinamento. A Malha 1, mais grosseira, Malha 2, de refinamento intermediário e a Malha 3, com bom refinamento. O resultado deste teste está apresentado na Tabela 4.1.

**Tabela 4. 1:** Detalhe das malhas testadas.

Testes	Refinamento	Tetraedros	Prismas	Total	Tempo computacional
Malha 1	Baixo	821852	86964	908816	1-2 horas
Malha 2	Intermediário	4859353	248991	5108344	~ 10 horas
Malha 3	Alto	9545896	481840	10027736	~ 48 horas

Para a escolha da malha foram comparados os resultados de perda de carga, para a velocidade de interesse. Não se verificou uma diferença significativa entre os resultados, apresentando variação de apenas 1 a 2 Pascais entre as malhas. Porém, o tempo computacional utilizado pela malha 3, por exemplo, foi muito superior as demais, como se observa na Tabela 4.1. Tomando como base o fator tempo computacional, decidiu-se pela utilização da Malha 1 (Figura 4.5), pois mesmo apresentando um refinamento baixo, os resultados de perda de carga foram próximos aos das demais malhas apesar da mesma utilizar um tempo computacional bem menor.

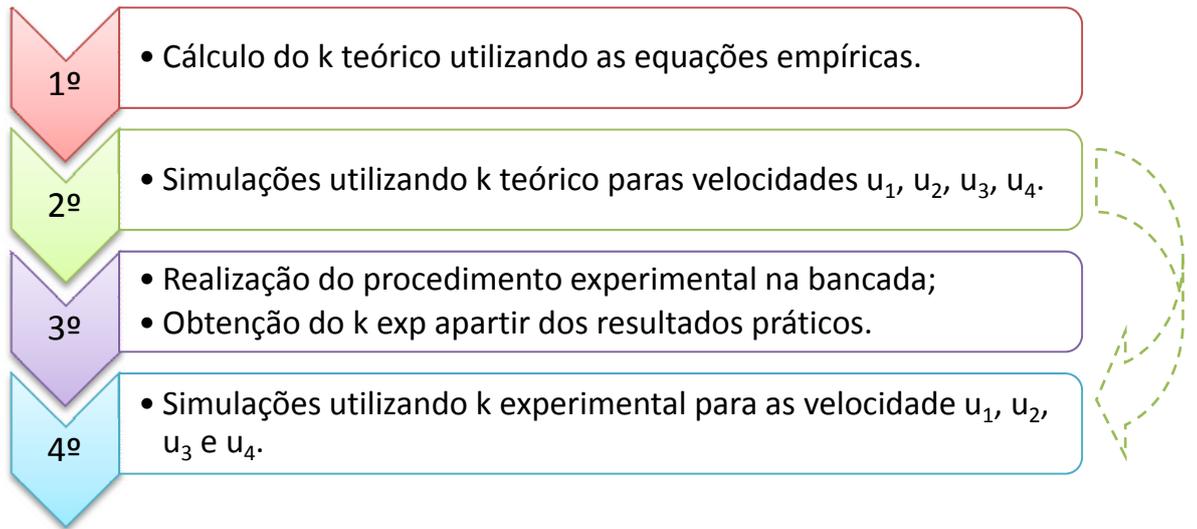


**Figura 4. 5:** Malha do filtro em detalhe.

É possível observar na Figura 4.5, que a malha apresenta um maior refinamento, principalmente, nas regiões próximas as venezianas, setor crítico da geometria, ou seja, zona de ocorrência de choques, maior turbulência, presença de vórtices, etc. No interior do leito optou-se por não refinar tanto a malha, e assim, facilitar a simulação, pois já é sabido que não é possível resolver as velocidades ( $u$ ,  $v$  e  $w$ ) exatamente como ocorrem no meio filtrante, sendo utilizado, apenas, o valor médio destas.

Os prismas foram colocados nas regiões onde ocorrem os maiores gradientes de velocidade, neste caso, foram utilizados na entrada e na saída do filtro e nas regiões cônicas. Estas regiões foram selecionadas devido a presença de uma grande diferença de área entre elas, fazendo com que a velocidade de escoamento também sofra uma variação brusca nestes pontos.

No capítulo seguinte será descrito como se realizou os procedimentos experimentais para validação dos resultados obtidos computacionalmente. Um resumo do procedimento realizado em todo o trabalho está representado esquematicamente na Figura 4.6.



**Figura 4. 6:** Esquema representativo do procedimento realizado.

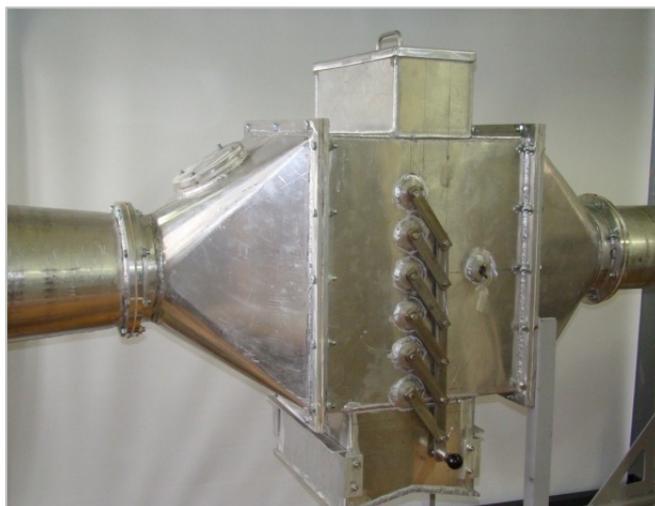
# Capítulo 5

## Procedimento Experimental

*Neste capítulo serão apresentadas e detalhadas as etapas relacionadas ao procedimento experimental realizado no filtro em escala de bancada, localizado no Laboratório de Ensaio Aerodinâmicos (LETA), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. Os resultados experimentais serão comparados e discutidos posteriormente.*

### 5.1 Aparato Experimental

Para este projeto foi construído um filtro em escala de bancada, que está apresentado na Figura 5.1. Nesta bancada foram realizados os experimentos para validação dos resultados computacionais.



**Figura 5. 1:** Filtro em escala de bancada.

A espessura do meio filtrante nesta configuração possui 100 mm, a altura total do filtro é de 500 mm e seu comprimento total (sem as tubulações) é em torno de 750 mm.

O meio filtrante é composto por esferas de vidro, diâmetro médio de 1 mm, fornecidas pela empresa Só Esferas de São Paulo. Utilizaram-se, aproximadamente, dois sacos com 5 kg de esferas para o preenchimento completo do filtro. A distribuição das esferas, após o preenchimento completo do filtro, pode ser observada na Figura 5. 2 (vista pela abertura superior e lateral esquerda do filtro).



**Figura 5. 2:** Leito completo com as esferas de vidro (a); preenchimento completo até o bocal de alimentação (b).

As condições de operação durante os experimentos e que foram empregadas nos cálculos são:

- Regime de escoamento: estado estacionário;
- Frequências usadas no ventilador: 10, 15, 20 e 25 Hz;
- Porosidade do meio filtrante ( $\epsilon$ ): 0,4;
- Esfericidade ( $\phi$ ): 1;
- Diâmetro médio das partículas do meio filtrante ( $d_p$ ): 1 mm;
- Temperatura média da operação: 25°C;
- Massa molar média do gás: 28 g/mol;
- Alimentação de particulados: nenhuma.

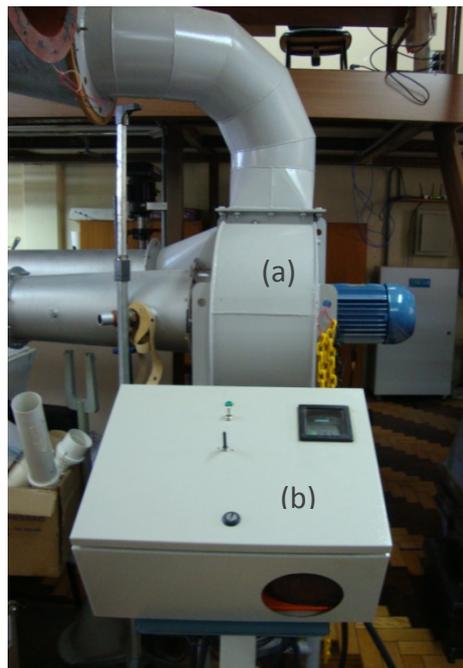
Todos os procedimentos experimentais se realizaram com o leito completamente cheio de esferas de vidro, para que a velocidade do gás após o leito e a perda de carga do filtro estivessem dentro dos valores reais de operação.

## 5.2 Materiais e Métodos

Anterior à medição da perda de carga do sistema foram necessários alguns procedimentos preliminares que serão descritos a seguir.

### 5.2.1 Medida do perfil de velocidade média e da vazão experimental na saída do filtro

Como o sistema de bancada do filtro não apresentava, até então, nenhum equipamento capaz de medir a velocidade do fluido, o único modo de controlar esta variável seria pelo inversor de frequência ligado ao ventilador, como mostra a Figura 5.3. Como foi explicado anteriormente, no inversor de frequência do ventilador é possível variar e controlar apenas a frequência deste, dada em Hertz (Hz). Como os dados de velocidade e vazão são imprescindíveis para o cálculo de perda de carga e para as informações de condições de entrada nas simulações, foi necessário verificar a velocidade do sistema para cada frequência aplicada a este.



**Figura 5. 3:** Detalhe do ventilador (a) conectado ao sistema e do inversor de frequências (b) à frente.

Para este procedimento se faz necessária a medida da Pressão de Velocidade (a pressão produzida pelo deslocamento de um fluido, que também pode ser chamada de pressão cinética). Além da pressão de velocidade também foi medida a Velocidade Média (média aritmética das velocidades uma seção transversal de um duto, medida nos pontos de amostragem) e a Vazão Volumétrica Média (volume de um gás que passa através da seção transversal de um duto por unidade de tempo).

Para realizar estas medidas são necessários os seguintes instrumentos:

- Tubo de Pitot Padrão;
- Micromanômetro – pressões de trabalho baixas;
- Termômetro;
- Barômetro.

Em um primeiro momento, foi feita a montagem do aparato: o Pitot foi conectado ao micromanômetro e inserido em duto extensor de PVC, com diâmetro de 100 mm, localizado após o ventilador. Este duto possui um diâmetro inferior ao do restante do conjunto de tubulações que compõem o sistema do filtro e foi colocado com o objetivo de aumentar a velocidade do ar neste ponto. Assim, criaram-se condições para a realização das medidas de velocidade utilizando um micromanômetro ou um anemômetro, já que a faixa de trabalho confiável destes equipamentos se dá acima de  $0,2 \text{ m.s}^{-1}$  (valores não atingidos com a tubulação de 200 mm). O comprimento do duto extra utilizado foi de aproximadamente 2 metros, distância essa que garantiu um perfil de velocidades mais uniforme após o ventilador, como pode se observar na Figura 5.4.



**Figura 5. 4:** Detalhe do duto extensor colocado após o ventilador para as medidas de velocidade.

Após a montagem do aparato e adequação dos equipamentos, iniciaram-se as medições. Neste procedimento, variou-se a posição do Pitot por seis pontos ao longo do

diâmetro do duto superior (100 mm) e obtiveram-se os valores de pressão, em milímetros de coluna d'água, lidos no micromanômetro aferido, para cada ponto do duto. A localização dos pontos através da seção transversal da tubulação, tanto na horizontal como na vertical, foi baseada na norma da ABNT de 1989, que determina os pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias (NBR 10701, 1989). Com a variação da posição do Tubo de Pitot através dos pontos determinados, foi obtido, para cada frequência do ventilador (10, 15, 20, 25 Hz), um perfil de velocidades do gás através do duto.

A metodologia utilizada para os cálculos da vazão experimental foi baseada nas normas: CETESB L9-222 (1992), CETESB L9-224 (1993), CETESB L9.225 (1990). A rotina de cálculos baseadas nestas normas, juntamente com descrição detalhada da determinação dos pontos de tomadas de velocidade, estão apresentadas no Apêndice B.

Para as condições de entrada utilizadas nas simulações faz-se necessário conhecer a velocidade média na entrada do filtro, ou melhor, na tubulação que antecede o filtro, cujo diâmetro é de 300 mm. Com os valores de velocidade média calculados através dos dados experimentais, determinou-se a velocidade na entrada do filtro, através da Equação (5.1).

$$u_{duto} A_{duto} = u_{filtro} A_{filtro} \quad (5.1)$$

onde:

$u_{duto}$ : velocidade do gás no duto de saída ( $m.s^{-1}$ );

$A_{duto}$ : área transversal do duto de saída, com diâmetro igual a 100 mm ( $m^2$ );

$u_{filtro}$ : velocidade do gás na tubulação anterior ao filtro ( $m.s^{-1}$ );

$A_{filtro}$ : área transversal da tubulação anterior ao filtro, com diâmetro igual a 300 mm ( $m^2$ ).

Os valores de  $u_{filtro}$  foram utilizados nas simulações subsequentes e nos demais procedimentos experimentais.

Do mesmo modo como foi calculada a velocidade na tubulação anterior ao filtro ( $u_{filtro}$ ), pode-se obter a velocidade superficial do leito ( $u_s$ ), utilizada nas equações de perda de carga e permeabilidade experimental. Utilizando a mesma Equação (5.1), porém alterando as semelhanças, tem-se a Equação (5.2):

$$u_{filtro} A_{filtro} = u_s A_s \quad (5.2)$$

onde:

$u_s$ : velocidade do gás na superfície do leito ( $m.s^{-1}$ );

$A_s$ : área referente a superfície do leito ( $m^2$ ).

### 5.2.2 Calibração da placa de orifício - obtenção do coeficiente de descarga experimental e vazão predita

Para o cálculo da queda de pressão no filtro são necessários os valores da vazão de alimentação do ar no filtro. Por este motivo, instalou-se no sistema uma placa de orifício, um instrumento muito utilizado na obtenção de medidas de vazão em escala industrial e tem como principais vantagens a simplicidade de operação, baixo custo, pouca necessidade de manutenção, entre outras. A sua principal restrição é a estreita faixa de operação, além da perda de carga considerável.

Na placa de orifício, assim como nos demais medidores de vazão por obstrução de área, a vazão é obtida através das medidas de diferença de pressão do escoamento, entre dois pontos, localizados antes e depois do orifício do disco. A diferença de pressão é produzida por efeitos inerciais - aceleração do escoamento devido à obstrução do escoamento (a redução de área do orifício) - e viscosos, como a perda de carga. A partir dela é possível se obter a vazão do sistema, utilizando como instrumentos de cálculo tabelas e fórmulas, ou, de maneira mais sofisticada, através de transdutores elétricos com processamento de sinais digitais com indicação dos valores de vazão *online*.

Esta vazão, obtida com o valor medido da diferença de pressão, é chamada de vazão teórica. Para se obter a vazão real é necessário que se inclua na equação geral um coeficiente, neste caso, o Coeficiente de Descarga ( $C_d$ ). Deste modo, a vazão real é o resultado do produto da vazão teórica pelo coeficiente de descarga. Ou seja, o coeficiente de descarga é um valor adimensional, obtido a partir da razão entre a vazão real, que escoou através do medidor, e a vazão teórica calculada com a Equação (5.3).

$$q_{teorica} = \frac{A_{obs}}{\sqrt{1-\beta_d^4}} \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (5.3)$$

onde:

$q_{teorica}$  = vazão mássica teórica ( $kg.h^{-1}$ );

$A_{obs}$  = área da seção transversal da obstrução ( $m^2$ );

$\beta_d = (d/D)$  = razão entre os diâmetros do orifício e do duto;

$\rho$  = massa específica do fluido ( $kg.m^{-3}$ );

$\Delta P = (p_1 - p_2)$  = diferença de pressão entre as seções anterior e posterior ao orifício.

É possível demonstrar, através de uma análise dimensional, que o coeficiente de descarga,  $C_d$ , é função da densidade e da viscosidade do fluido, da vazão e de um diâmetro característico, ou seja, depende do número de Reynolds do escoamento.

Para casos mais gerais de um escoamento compressível, a vazão real é o produto da vazão teórica com o coeficiente de descarga e o fator de compressibilidade ou expansividade ( $Y$ ). O coeficiente de expansão também pode ser determinado experimentalmente, pois depende das características geométricas do medidor, das características do fluido de trabalho e das condições operacionais do medidor.

Logo a Equação (5.4) define a vazão mássica real do escoamento utilizando esses dois coeficientes,

$$q_{real} = C_d \cdot Y \frac{A_{obs}}{\sqrt{1-\beta_d^4}} \sqrt{2\rho\Delta P} \quad (5.4)$$

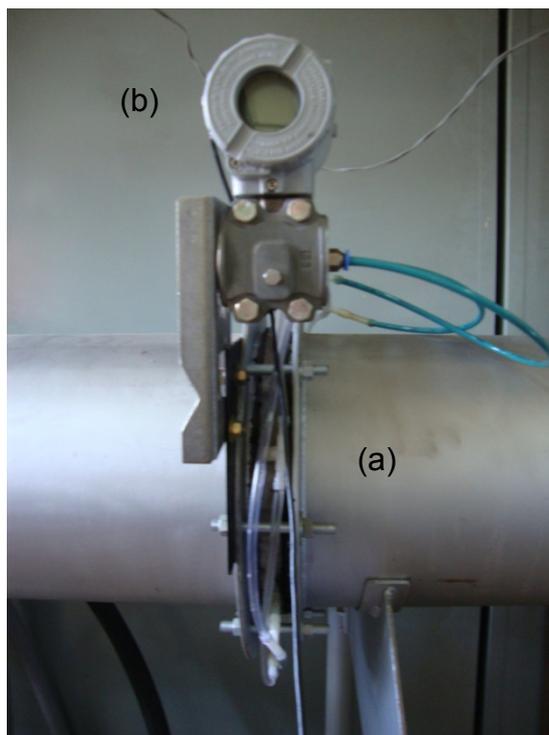
onde,  $C_d$  é o coeficiente de descarga e  $Y$  é coeficiente de expansão.

Para a utilização confiável dos dados obtidos pela placa se faz necessária sua calibração prévia. Os cálculos detalhados são apresentados no Apêndice C deste trabalho.

### **Calibração da placa de orifício**

Para calibração ou aferição de um medidor de vazão por obstrução de área é necessário determinar a sua curva de vazão real versus a diferença de pressão. Ou de forma adimensional, na determinação da curva de  $C_d$  versus o número de Reynolds.

A placa de orifício em questão está localizada em uma seção anterior ao filtro e ao ponto de injeção do material particulado. A placa utilizada é do tipo circular concêntrica, com borda quadrada feita de aço inoxidável, conforme a norma ASME MFC - 3M (2004). O diâmetro interno da tubulação onde está localizada a placa é de 270 mm e o diâmetro do orifício central desta é de 70 mm. A diferença de pressão da placa é medida através de pontos de tomada de pressão de canto, conectados entre si e a um manômetro digital SMAR, como mostra a Figura 5.5.



**Figura 5. 5:** Placa de orifício conectada ao sistema. Em detalhe os pontos de tomada de pressão de canto (a) conectados entre si e ao manômetro digital (b).

Para a calibração desta placa foram feitos oito ensaios para as quatro frequências do ventilador. Em cada ensaio foi medida a diferença de pressão da placa e o perfil de velocidades, do mesmo modo realizado no procedimento anterior (descrito na seção 5.2.1).

Além dos valores de  $\Delta P$ , lidos no manômetro digital, foram coletados também os valores de pressão estática da placa anterior ao orifício. Para isso, foi desconectada do manômetro a conexão referente ao ponto posterior ao orifício.

Em todos os ensaios foram medidas a temperatura de operação, a pressão barométrica e a umidade relativa, no ambiente do laboratório, utilizando um equipamento da marca VAISALA. Um modelo de tabela usada nos ensaios para o preenchimento adequado dos dados é apresentada no Apêndice D.

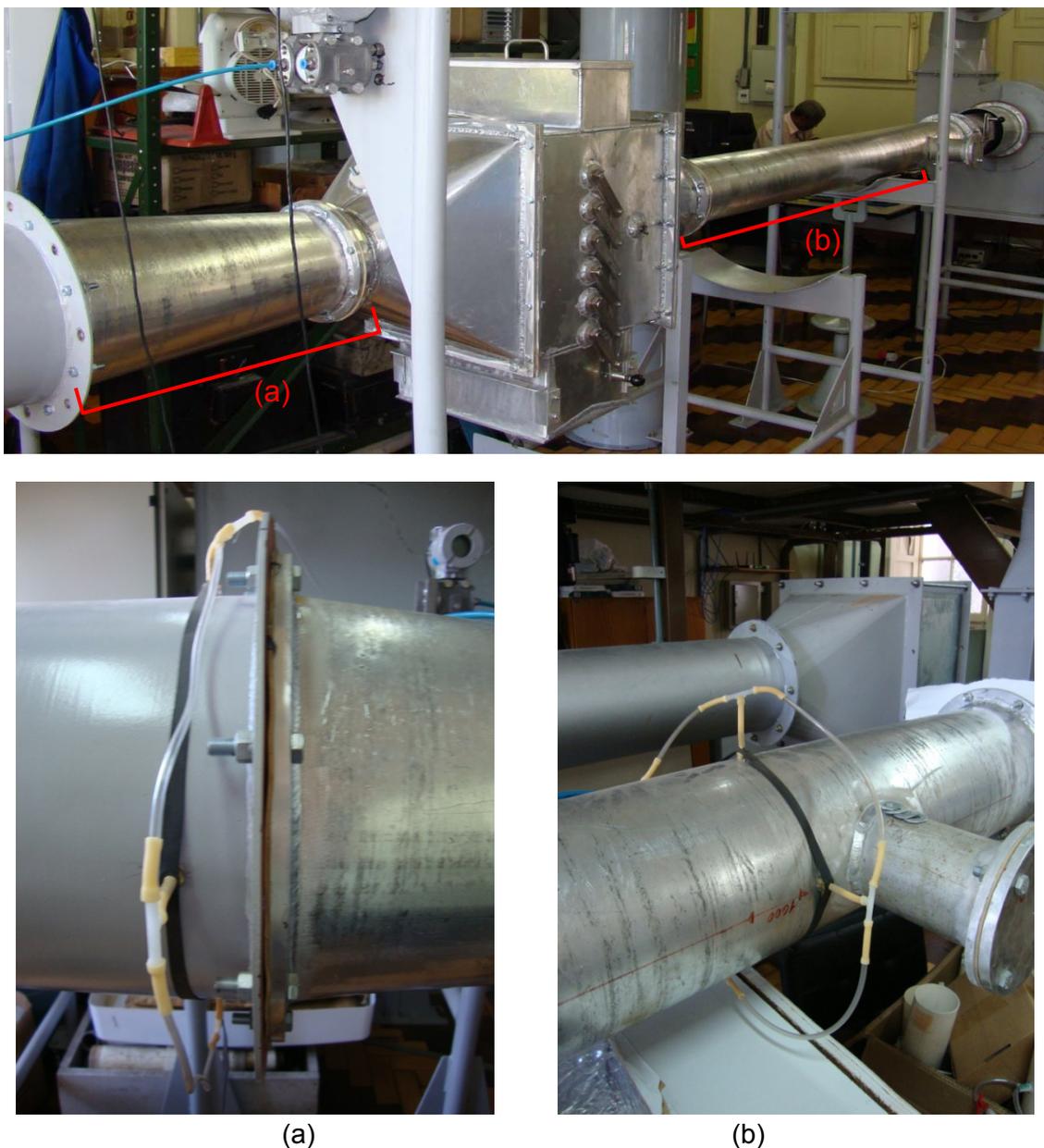
A partir dos dados experimentais coletados determinou-se o coeficiente de descarga experimental e a vazão real, medida pelo Pitot. Além disso, foram calculados, a partir da norma ASME MFC-3M (2004), os valores de vazão teórica, coeficiente de descarga teórico, coeficiente de expansividade e, por fim, a vazão real predita. Todos estes cálculos estão descritos detalhadamente no Apêndice C desta dissertação.

### 5.2.3 Medida de perda de carga no filtro

Como foi mencionado anteriormente, o principal objetivo deste trabalho é verificar a

perda de carga no filtro sem a injeção de particulados. Para se obter o  $\Delta P$  do filtro são necessárias as medidas de pressão em dois pontos da linha, uma antes do leito ( $p_2$ ) e uma após o leito ( $p_1$ ) e a diferença entre essas pressões.

A determinação exata da distância destes pontos para tomada de pressão, em relação ao leito, foi baseada na norma da ABNT, NBR 10701 (1989) que define, assim como para a tomada de velocidade, a tomada de pressão deve ser feita três diâmetros à montante e 8 diâmetros à jusante de qualquer singularidade (curva, joelho, contração, expansão, etc. Logo, a localização destes está demonstrada na Figura 5.6 e exemplificada, separadamente, em (a) e (b).



**Figura 5. 6:** Localização dos pontos de tomadas de pressão na linha, antes (a) e após (b) o filtro, em detalhe.

Em cada um desses pontos foram feitos quatro furos ao redor da tubulação. Esses furos foram conectados por mangueiras, vedados e ligados a um medidor de pressão SMAR (modelo D1), o mesmo tipo usado na placa de orifício. Este medidor informa a diferença de pressão entre os dois pontos e a pressão estática anterior ao leito, ao se desconectar a mangueira referente a este.

Para este procedimento foram realizados 8 conjuntos de testes para as mesmas frequências do ventilador. Como no procedimento anterior de calibração da placa, também foram medidas a temperatura, pressão barométrica e umidade relativa do laboratório.

#### **5.2.4 Obtenção da permeabilidade hidráulica experimental**

Conforme descrito nos Capítulos 2 e 4 deste trabalho, foram empregados nas simulações dois valores de permeabilidade hidráulica. O primeiro valor utilizado foi o teórico ( $k_1$ ), calculado empiricamente, utilizando a Equação (2.6) de Blake-Kozeny. Para o cálculo desta permeabilidade foi necessário estimar um fator relativo à geometria da seção de filtração do leito, o fator de forma  $\beta$ . Com o valor de  $k_1$ , realizaram-se as simulações preliminares.

Com o início dos procedimentos experimentais na bancada, utilizando da Equação (2.5) de Darcy determinou-se, através da inclinação da curva dos dados experimentais de perda de carga versus velocidade de filtração, a permeabilidade hidráulica experimental ( $k_2$ ).

Esse valor foi utilizado em simulações subsequentes cujos resultados foram comparados com os obtidos com a permeabilidade teórica e com modelos empíricos.

# Capítulo 6

## Resultados e Discussão

*Este capítulo destina-se à apresentação e discussão dos resultados obtidos nas simulações e nos experimentos para o filtro granular em estudo. Primeiramente serão apresentados os resultados experimentais, tais como velocidade média, vazão do ar e perda de carga no filtro. A partir destes dados obteve-se a permeabilidade hidráulica experimental. Os resultados computacionais foram obtidos para ambos os valores de permeabilidade hidráulica, teórica e experimental. Os resultados experimentais de perda de carga no filtro foram comparados aos computacionais e aos resultados obtidos através do emprego de modelos empíricos.*

### 6.1 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais serão apresentados na ordem em que foram descritos no Capítulo 5.

#### 6.1.1 Velocidade média de ar e Vazão

Conforme detalhado no Capítulo 5 e no Apêndice B, a velocidade média do gás na saída do duto ( $u_{duto}$ ), para cada frequência do ventilador, foi obtida a partir do cálculo da média das velocidades obtidas nos oito testes. Assim como a velocidade do gás no duto, a vazão mássica experimental foi obtida através das Equações (B.8) e (B.9). Os valores de velocidade do gás ( $u_{duto}$ ) e de vazão mássica do gás ( $q_{duto}$ ) estão apresentados na Tabela 6.1.

**Tabela 6. 1:** Valores de velocidade no duto ( $u_{duto}$ ) em cada teste e média para cada frequência de trabalho no ventilador.

Testes	10 Hz		15 Hz		20 Hz		25Hz	
	$u_{duto}$ (m/s)	$q_{duto}$ (kg/h)	$u_{duto}$ (m/s)	$q_{duto}$ (kg/h)	$u_{duto}$ (m/s)	$q_{duto}$ (kg/h)	$u_{duto}$ (m/s)	$q_{duto}$ (kg/h)
1	2,66	88,1	3,76	124,4	4,99	165,2	5,28	174,8
2	1,67	55,5	2,50	83,5	3,28	109,2	4,24	141,1
3	1,59	53,2	2,31	76,9	3,57	119,0	4,77	158,9
4	1,71	57,1	3,17	105,8	3,85	128,9	5,10	170,0
5	2,35	78,7	3,24	108,3	4,12	137,9	5,18	173,4
6	1,65	55,4	2,75	92,1	3,86	129,1	4,74	158,8
7	1,60	53,2	2,60	86,4	3,85	128,0	5,02	166,8
8	1,60	53,1	2,63	87,3	3,70	123,0	4,89	162,7
<b>Média</b>	<b>1,85</b>	<b>61,79</b>	<b>2,87</b>	<b>95,59</b>	<b>3,71</b>	<b>130,04</b>	<b>4,90</b>	<b>163,31</b>

Para as velocidades maiores, obtidas nas maiores frequências, 20 e 25 Hz, foi observada uma maior variação durante leitura do manômetro conectado ao Pitot. Isto está relacionado, principalmente com a posição do ventilador em relação ao filtro e, também, da localização do ponto de tomada de pressão, após o ventilador. Estes fatores interferem, principalmente, no fluxo do gás na tubulação.

Os valores de vazão mássica do gás apresentados na Tabela 6.1 são valores experimentais. A correção, destes valores de vazão utilizados nos cálculos e nos gráficos, foi calculada e estes dados estão apresentados no Apêndice B deste trabalho.

Com os valores médios das velocidades do gás no duto, foram obtidas as velocidades na entrada do filtro ( $u_{filtro}$ ), utilizando a Equação (5.1). De modo semelhante, porém utilizando a Equação (5.2), se obteve outra variável importante para os cálculos de perda de carga, a velocidade superficial do gás ( $u_s$ ). Os resultados estão apresentados na Tabela 6.2.

**Tabela 6. 2:** Valores de velocidade do gás ( $m \cdot s^{-1}$ ) antes do filtro ( $u_{filtro}$ ) obtidos a partir da média da velocidade do gás no duto ( $u_{duto}$ ).

	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
<b>Valores médios de <math>u_{duto}</math></b>	1,85	2,87	3,71	4,90
$u_{filtro}$	0,20	0,30	0,40	0,50
$u_s$	0,17	0,26	0,33	0,44

No cálculo da velocidade superficial do gás, o valor considerado para a área da superfície do leito foi de  $0,088 \text{ m}^2$ .

### 6.1.2 Perda de Carga Experimental no Filtro

Os resultados de perda de carga experimental do filtro ( $\Delta P$ ) foram obtidos utilizando um manômetro digital conectado em dois pontos de tomada de pressão na tubulação, um à montante outro à jusante, conforme apresentado em detalhes na Seção 5.2.3 do Capítulo 5 deste trabalho.

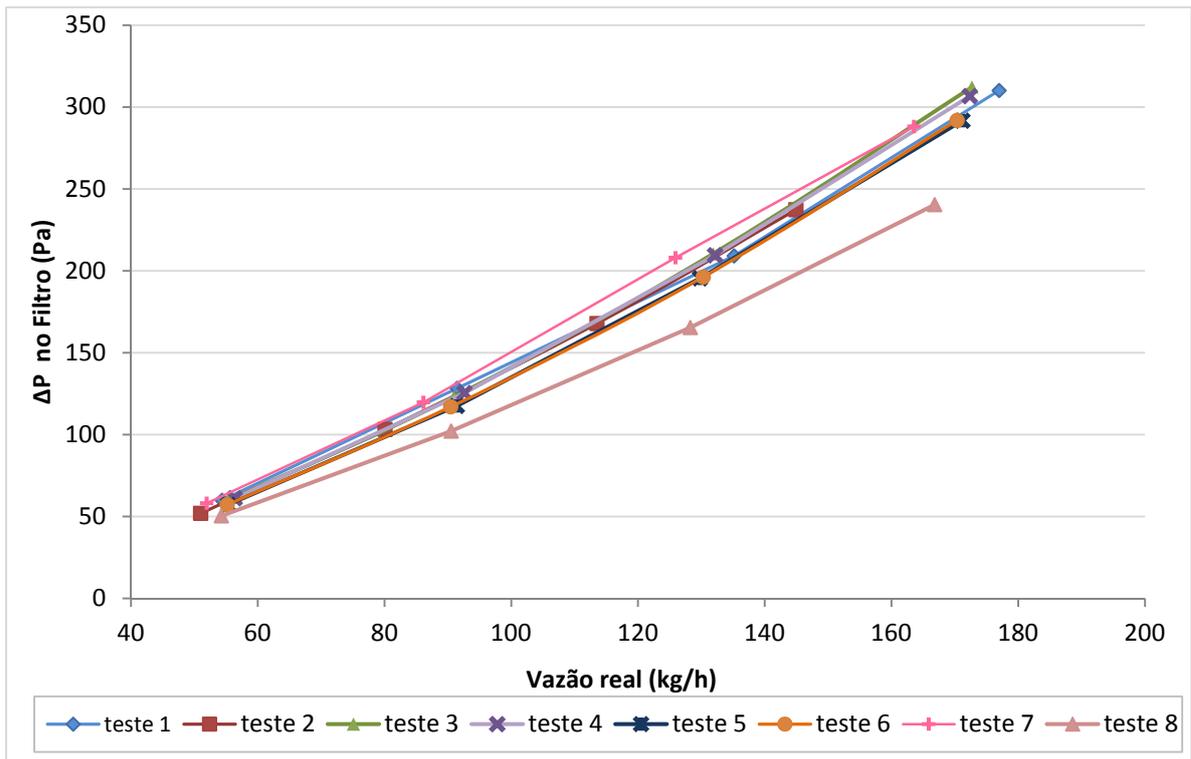
Foram realizadas medidas para cada frequência do ventilador empregada em oito testes. Os resultados de  $\Delta P$  do filtro em cada teste estão apresentados na Tabela 6.3.

**Tabela 6. 3:** Valores de perda de carga para cada teste realizado no filtro.

	<b>10 Hz</b>	<b>15 Hz</b>	<b>20 Hz</b>	<b>25Hz</b>
<b>Testes</b>	$\Delta P_{\text{filtro}}$ (Pa)	$\Delta P_{\text{filtro}}$ (Pa)	$\Delta P_{\text{filtro}}$ (Pa)	$\Delta P_{\text{filtro}}$ (Pa)
<b>1</b>	60,0	128,3	209,1	310,1
<b>2</b>	51,9	103,2	167,8	237,4
<b>3</b>	59,7	123,1	210,4	312,2
<b>4</b>	61,1	125,4	209,5	306,7
<b>5</b>	57,2	117,5	195,4	291,7
<b>6</b>	57,2	117,0	196,2	291,9
<b>7</b>	58,1	119,7	208,1	288,1
<b>8</b>	50,4	102,2	165,4	240,4
<b>Média</b>	<b>57,0</b>	<b>117,1</b>	<b>195,2</b>	<b>284,8</b>

Como era previsto para este tipo de filtro de leito fixo, a perda de carga aumenta com a o aumento da velocidade do gás, ou seja, conforme o aumenta a frequência do ventilador. Como não há formação de torta, devido a não injeção de particulado, o aumento é quase linear.

Para visualizar de maneira mais clara o comportamento do aumento da perda de carga com o aumento da vazão do gás, construiu-se o gráfico de perda de carga versus vazão real com todos os dados de cada teste no filtro. Este gráfico está representado na Figura 6.1.



**Figura 6. 1:** Gráfico de  $\Delta P$  versus vazão real do gás para todos os testes realizados no filtro.

Os valores de vazão de gás utilizados a partir deste ponto são os valores de vazão real, ou seja, a vazão medida pela placa de orifício, corrigida com o Coeficiente de Descarga obtido experimentalmente.

Pode-se perceber que as curvas de cada teste apresentam o mesmo comportamento, o que mostra uma boa repetibilidade do sistema de filtração, quanto à perda de carga do mesmo. Como exceção, a curva referente ao teste 8 apresentou uma pequena variação em relação ao comportamento das demais, certamente, devido ao escoamento do leito, ocasionado pelas seguidas repetições dos experimentos.

Nas seções seguintes deste capítulo, serão apresentados os resultados de perda de carga obtidos nas simulações e, então, serão comparados com os resultados experimentais.

### 6.1.3 Permeabilidade Hidráulica

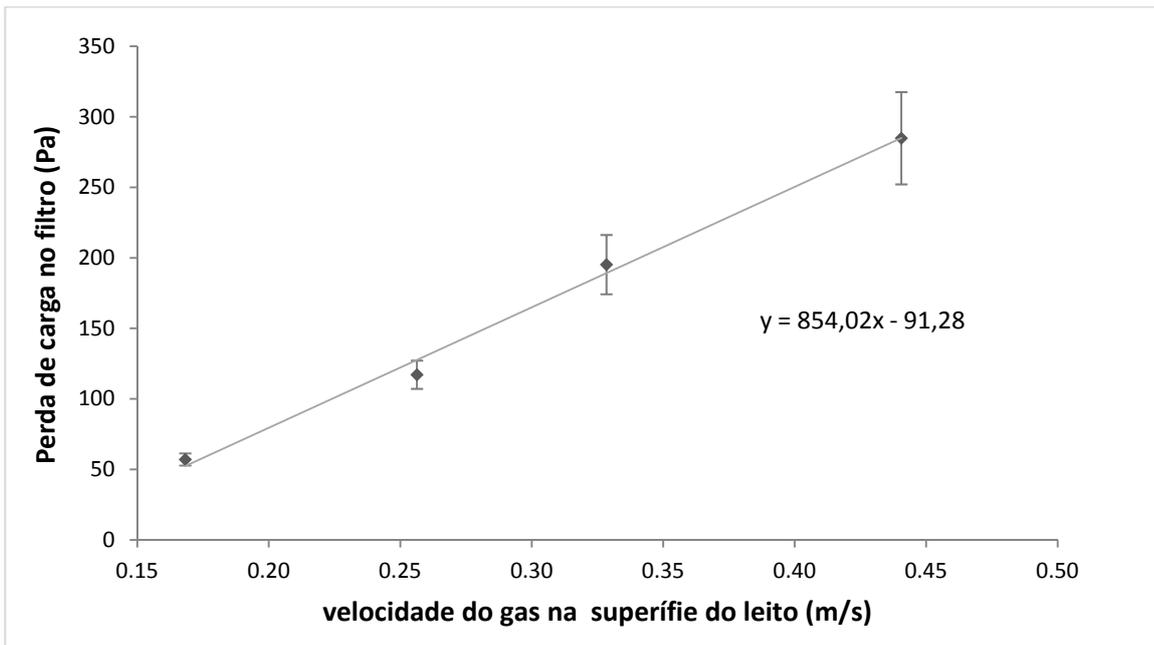
A permeabilidade hidráulica foi, primeiramente, determinada através das equações empíricas de perda de carga, como a equação de Blake-Kozeny (2.6). Esta equação utiliza um fator de forma adimensional  $\beta$ , que correlaciona a geometria de filtração com a perda de carga do sistema.

Utilizando os dados de projeto do filtro, calculou-se o fator  $\beta$  conforme a Equação (2.7). Encontrou-se para  $\beta$  o valor de 1,76, que inserido na Equação (2.6) de Blake-Kozeny,

obteve-se para a permeabilidade teórica,  $k_1$  o valor de:

$$k_1 = 2,80 \times 10^{-9} m^2$$

Com os valores de perda de carga e velocidade superficial, foi possível calcular o valor experimental para a permeabilidade hidráulica. Com base na lei de Darcy (Equação (2.5)), a inclinação da curva de dados experimentais de  $\Delta P$  versus  $u_s$  fornece a permeabilidade hidráulica experimental. A figura 6.2 mostra os resultados obtidos.



**Figura 6. 2:** Gráfico de perda de carga versus velocidade superficial para obtenção da permeabilidade hidráulica.

A partir da equação da reta da Figura 6. 2 em conjunto com a Equação (2.5), encontra-se o valor da permeabilidade hidráulica experimental,  $k_2$ .

$$k_2 = 2,16 \times 10^{-9} m^2$$

Os dois valores de permeabilidade foram utilizados nas simulações e comparados com os resultados experimentais.

## 6.2 Resultados Computacionais

### 6.2.1 Perda de Carga do Filtro

Utilizou-se os valores de  $k_1$  (teórico) e  $k_2$  (experimental) de permeabilidade no domínio poroso para a realização das simulações (com a malha 1 nas quatro velocidades de

interesse deste problema), cujos resultados de perda de carga estão apresentados na tabela 6.4 juntamente com os resultados experimentais.

**Tabela 6. 4:** Resultados computacionais e experimentais de perda de carga no filtro.

Frequência do ventilador (Hz)	Vazão real (kg.h <sup>-1</sup> )	Velocidade do gás na entrada do filtro (m.s <sup>-1</sup> )	Perda de carga $\Delta P$ (Pa)		
			Simulações		Experimental
			Para $k_1=2,80 \times 10^{-9} \text{ m}^2$	Para $k_2=2,16 \times 10^{-9} \text{ m}^2$	
10	54,6	0,2	116	150	57,0
15	89,5	0,3	174	225	117,0
20	128,3	0,4	233	301	195,2
25	166,9	0,5	219	377	284,8

Conforme a teoria afirma, a perda de carga consiste na diferença entre a média das pressões absolutas em dois pontos do sistema. No caso do filtro estes pontos estão localizados na entrada e na saída do sistema. Para que seja viável a operação de filtração, é necessário que ela apresente a menor perda de carga para uma maior eficiência possível de retenção de particulados.

Porém, como neste trabalho não se avaliou a eficiência de remoção de particulados pelo filtro, comparou-se, então, os resultados de perda de carga obtidos com outros sistemas semelhantes de filtração em leito fixo. É importante salientar que com a retenção de particulados pelo leito e a consequente formação da torta, a perda de carga irá aumentar até o ponto de saturação do leito. Considerando este critério, os resultados experimentais e computacionais, estão dentro do esperado para um filtro de leito fixo, com esta porosidade. Assim, é possível comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados do estudo experimental feito por YANG *et al.* (2007), para um leito constituído de areia e perlita. A perda de carga obtida foi de 212-505 Pa para o leito de areia, 224-525 Pa para um leito formado por duas camadas (sendo uma com 75 mm de areia e outra com 80 mm de perlita) e uma perda de carga de 215-511 Pa para um leito também formado de duas camadas, porém uma de areia com 75 mm e outra de perlita, um pouco maior, com 180 mm.

É sabido que a perda de carga aumenta consideravelmente com a redução do diâmetro das partículas que constituem o leito, como acontece com a areia. O diâmetro médio da perlita é em torno de 2 a 5 mm, enquanto que o diâmetro médio da areia é de 0,5 a 1  $\mu\text{m}$ . No caso do filtro em estudo neste presente trabalho, o diâmetro das esferas de vidro, que constituem o leito, é de aproximadamente 1 mm, valor que ficaria no intervalo entre os dois diâmetros apresentados no trabalho de YANG *et al.*

Para que se possa verificar e comparar os resultados obtidos de maneira mais clara, construiu-se o gráfico de  $\Delta P$  versus vazão de gás, conforme mostra a Figura 6.3.

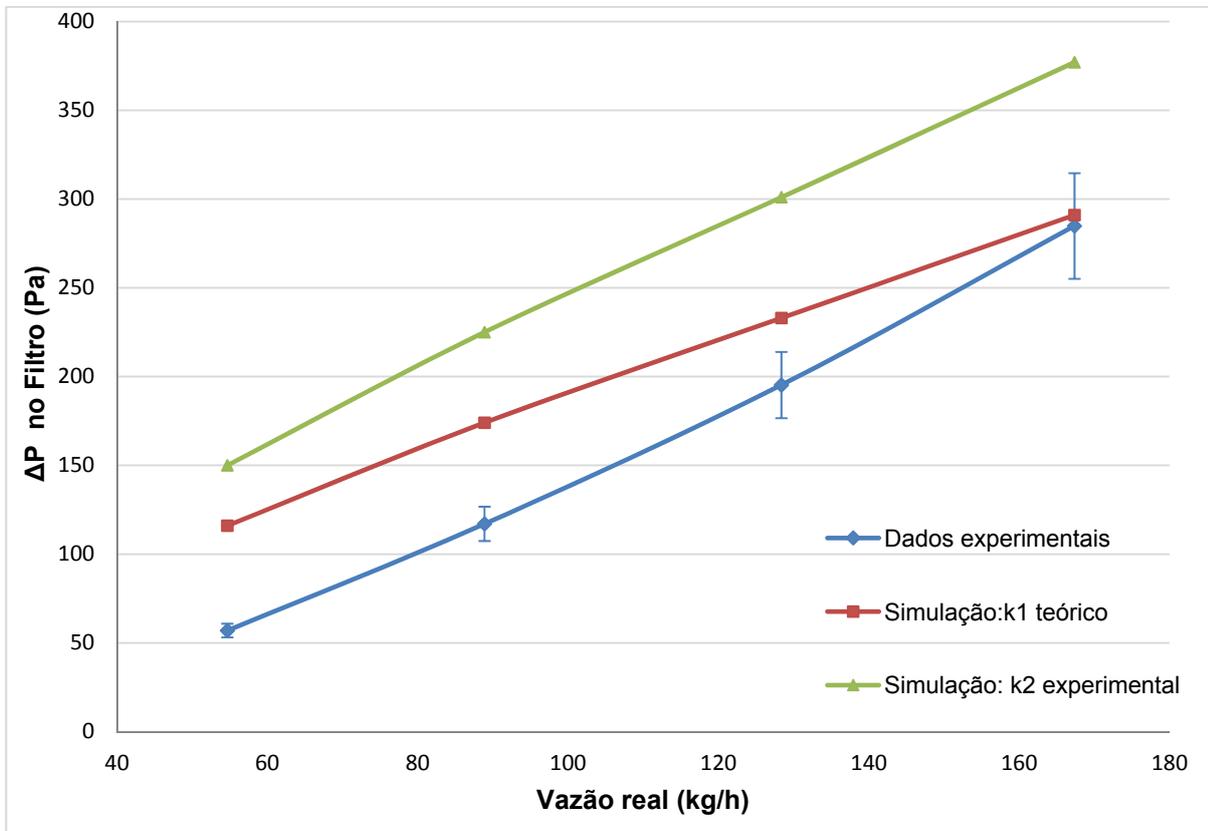


Figura 6. 3: Gráfico de  $\Delta P$  versus vazão real.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 6.3, observa-se que as três curvas apresentam o mesmo comportamento, ou seja, o aumento da perda de carga com a vazão de gás, confirmando o que era esperado. Verifica-se, também, que os resultados computacionais das simulações são resultados aceitáveis, porém na prática os valores de perda de carga encontrados foram menores do que previa o modelo matemático. Isto se deve principalmente, às simplificações feitas no modelo utilizado pelo Software para a resolução do problema, como será esclarecido na sequência.

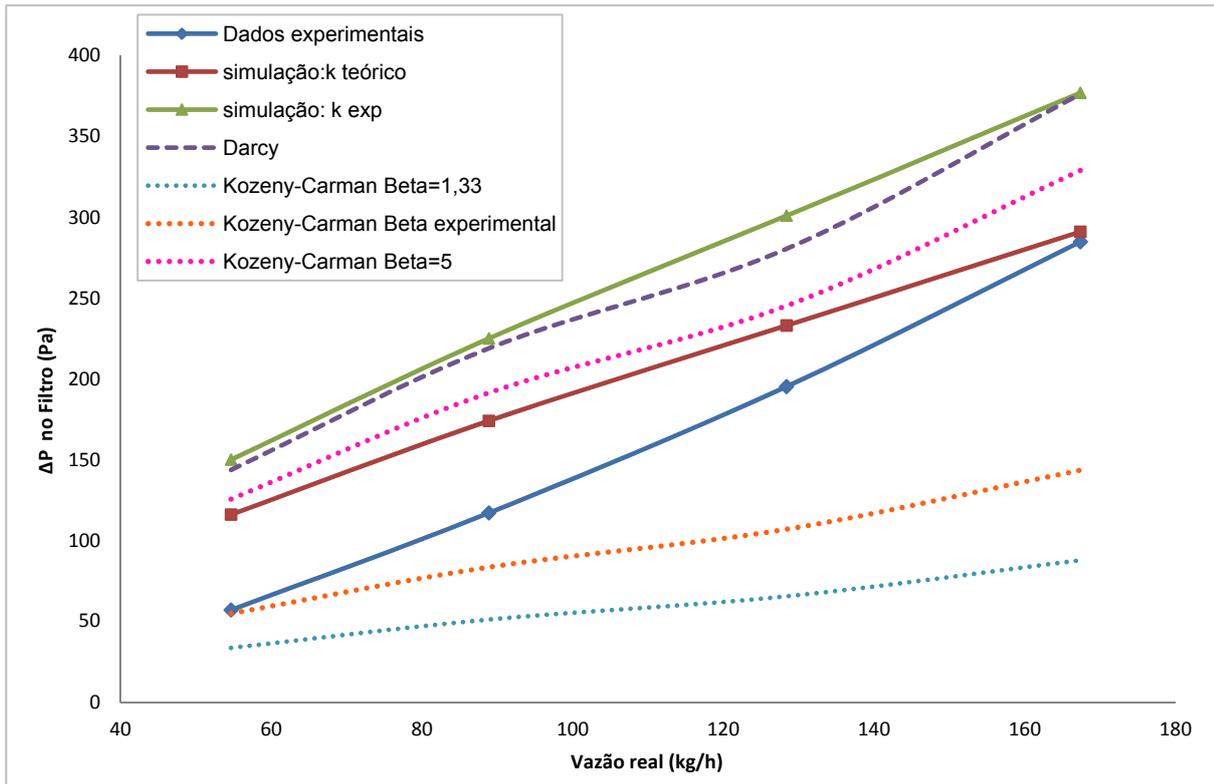
Como descrito no Capítulo 4 desta dissertação, o ANSYS® CFX 11.0 utiliza, para escoamento em meios porosos, a Lei de Darcy. Esta lei considera apenas a influência da permeabilidade do sistema na perda de carga, ao contrario do que considera a equação de Kozeny-Carman. Na prática percebe-se que a Lei de Darcy não descreve de maneira precisa o fenômeno estudado, fato que se verifica pelo desvio que ambas as curvas originadas pelos resultados computacionais apresentam em relação à curva experimental. É possível concluir que o fenômeno tem a influência de outras variáveis não consideradas, como o diâmetro da partícula, esfericidade e porosidade da torta (que também não

influencia neste caso). Além destas influências destas variáveis que não foram consideradas nos resultados das simulações, é provável que tenha ocorrido a formação de orifícios e caminhos preferenciais através do leito, que reduziriam a perda de carga no mesmo. Conforme verificado pelo estudo de KUO *et al.* (2010), a densidade e o tamanhos dos orifícios formados em leitos granulares aumentam com a velocidade do gás na face.

Outro ponto a ser citado é a diferença entre os resultados computacionais, que está relacionada à mudança do valor da permeabilidade hidráulica utilizado. Através da Lei de Darcy, chega-se a conclusão que a perda de carga é inversamente proporcional à permeabilidade hidráulica ( $k$ ), ou seja, para maiores valores de  $k$ , como é o caso de  $k_1$ , os resultados de perda de carga serão menores. Já para valores mais baixos de  $k$ , como é o caso de  $k_2$  que foi obtido experimentalmente, os valores de perda de carga são mais altos.

O gráfico da Figura 6.3 mostra que o desvio padrão referente aos resultados experimentais é aceitável, apresentando valores maiores para as maiores vazões. Esta diferença se deve a grande variação dos valores de  $\Delta P$  durante a leitura no manômetro digital dos experimentos, comportamento que não se verificou com tanta intensidade para as vazões mais baixas. Optou-se por utilizar uma leitura média dentro das variações apresentadas, o que pode ser considerado um fator de erro para os resultados experimentais.

Com o intuito de avaliar quais são os dados teóricos de perda de carga que melhor se ajustam aos dados experimentais, calculou-se a perda de carga utilizando a Equação de Kozeny-Carman (2.7) para diversos valores de  $\beta$ . Utilizou-se  $\beta$  igual a 1,33, calculado conforme as Equações (2.8), (2.9) e (2.10),  $\beta$  igual a 5, baseado na teoria do modelo capilar e  $\beta$  igual a 2,29, calculado utilizando a permeabilidade experimental ( $k_2$ ). A Figura 6.4 a seguir, apresenta o gráfico que compara as curvas para os casos citados.



**Figura 6. 4:** Gráfico comparativo para perda de carga entre os dados teóricos (.....) e os práticos (—)

As curvas tracejadas mostradas na Figura 6.4 representam os resultados teóricos de perda de carga baseados na Lei de Darcy e na equação de Kozeny-Carman. A principal diferença entre os resultados apresentados para as três curvas baseadas na teoria de Kozeny-Carman está relacionada com o valor do fator de forma  $\beta$  utilizado em cada caso.

Sabendo que o fator de forma  $\beta$  influencia diretamente no valor da permeabilidade  $k$ , conforme a Equação (2.6), um maior valor de  $\beta$  acarreta em menor valor de  $k$ , pois estas são grandezas inversamente proporcionais.

Um menor valor de  $k$  condiciona uma maior perda de carga para o sistema, como se percebe no comportamento da curva referente ao modelo capilar para o escoamento em meios porosos ( $\beta$  igual a 5), levando a valores mais altos de perda de carga. Esta curva está situada próxima às curvas dos resultados obtidos nas simulações, o que mostra certo desvio em relação aos dados reais. Logo, o modelo capilar, baseado em experimentações, ao assumir o valor de  $\beta$  igual a 5 - válido para leitos formados por esferas uniformes (CARMAN, 1937) -, acaba generalizando o modelo, que não pode ser aplicado para descrever, de maneira exata, qualquer tipo de sistema de escoamento em leito fixo. Resultado este que difere para as curvas calculadas a partir do  $\beta$  teórico, igual a 1,33, e do  $\beta$  experimental igual a 2,29, que apresentam valores mais baixos de perda de carga.

REDDY e JOSHI (2008) realizaram um estudo computacional com objetivo de verificar o escoamento padrão em leitos fixos e fluidizados para os regimes laminar, transiente e turbulento. Neste estudo os autores compararam os resultados computacionais com resultados experimentais da literatura e resultados empíricos dados pela equação de Ergun. Pela comparação com a equação de Ergun, os valores de perda de carga simulados mostraram-se subestimados para regimes laminares e superestimados para regimes turbulentos. Além da perda de carga, REDDY e JOSHI avaliaram, também os resultados de coeficiente de atrito e verificaram que os valores preditos nas simulações estavam em concordância com os resultados experimentais, com exceção dos resultados referentes ao regime turbulento.

As justificativas apresentadas pelos autores para as discordâncias encontradas, também podem ser aplicadas para o caso deste trabalho de dissertação, ou seja:

- Má qualidade da malha tetraédrica desestruturada, que formaria lacunas estreitas entre os interstícios, locais onde se verificam as maiores velocidades;
- Divergências do modelo de turbulência empregado.

No caso de Reddy e Joshi o modelo utilizado foi o  $k-\varepsilon$ , modelo caracterizado como isotrópico, que não captura os efeitos de curvatura e separação da camada limite principalmente para altos valores de Reynolds. Porém nesta dissertação utilizou-se o modelo de turbulência  $k-\omega$ , que apresenta algumas vantagens frente ao modelo  $k-\varepsilon$ , tais como o tratamento próximo à parede para baixos números de Reynolds e o não envolvimento do amortecimento de funções não lineares mais complexas empregadas no modelo  $k-\varepsilon$ .

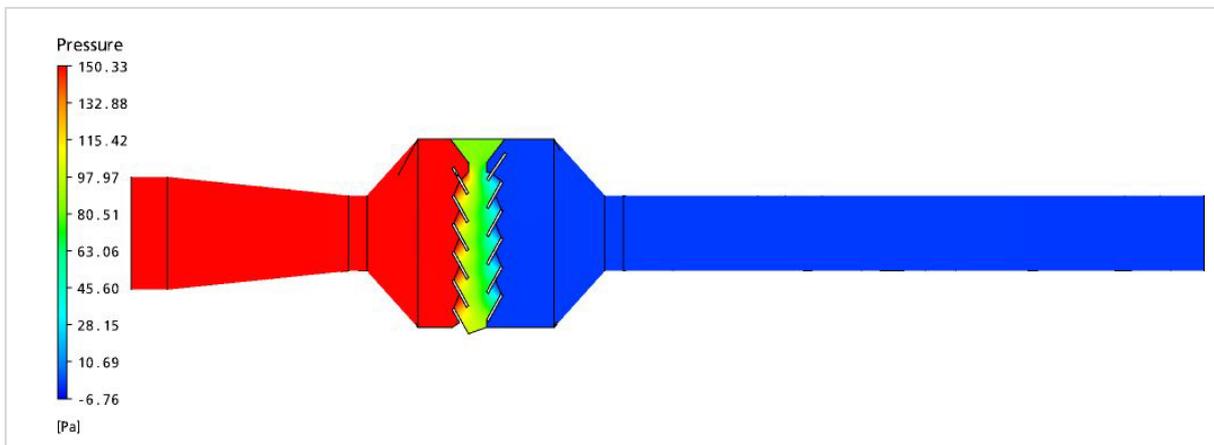
É importante salientar que foram feitas simulações para os modelos  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  e ambos apresentaram resultados de perda de carga muito próximos, porém com uma diferença relevante quanto ao tempo de convergência. No caso do modelo  $k-\varepsilon$  foi necessário um tempo muito maior de convergência que o necessário para o modelo  $k-\omega$ .

### **6.2.2 Perfil de pressão ao longo do filtro**

Na maioria dos estudos apresentados, na literatura sobre filtros granulares, o principal objetivo sempre é a obtenção da variação/aumento da perda de carga com o tempo, além da avaliação da eficiência de coleta de particulados. O trabalho feito por NEIVA e GOLDSTEIN (2003) avalia justamente a formação (e o aumento) da torta e a da perda de carga com o tempo, para um filtro cerâmico. Os autores compararam três modelos de formação de tortas, constituídas com uma, duas e três camadas, com modelos empíricos de Darcy, Kozeny-Carman e Heppel. O valor de perda de carga variou entre 200 e 300 Pa,

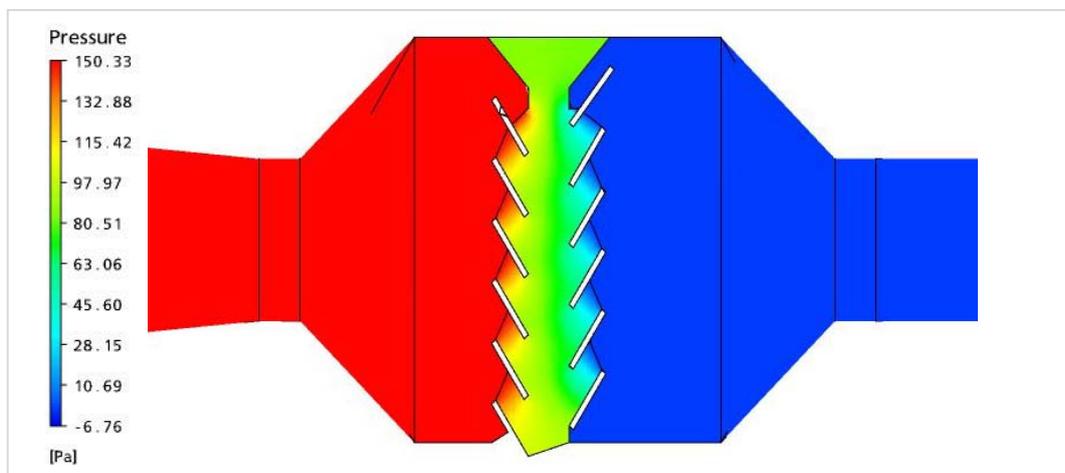
sendo que o modelo de duas camadas foi o que mais se aproximou dos três modelos empíricos estudados. Ao contrário do observado nesta dissertação, o modelo de Darcy ficou mais próximo dos valores experimentais. Isto pode ser explicado devido ao fato do filtro considerado no estudo ser cerâmico, e que tamanho das partículas do leite, fator não considerado por Darcy em sua equação, não interfere no resultado de perda de carga.

O perfil da variação de pressão através do sistema completo formado pelo filtro e tubulações é possível de visualizar através do ANSYS<sup>®</sup> CFX- Post. A Figura 6.5 apresenta o perfil de pressão através do sistema, para qualquer vazão e para ambos os valores de permeabilidade hidráulica. O plano de corte foi feito na direção XY em  $z = 0$ , ou seja no centro da imagem do filtro.



**Figura 6. 5:** Perfil de pressão através das tubulações e do filtro.

É possível perceber claramente que a variação de pressão se concentra apenas entre os limites do leito. Para ilustrar mais claramente, a Figura 6.6 apresenta o detalhe do perfil de pressão no leito filtrante.



**Figura 6. 6:** Detalhe do perfil de pressão no leito(local que apresenta maior perda de carga).

Observa-se, ainda, nas Figuras 6.5 e 6.6, que a queda de pressão nas seções cônicas é praticamente nula se comparada com a queda de pressão no leito. Isto pode ser explicado pela Equação (2.6), em que a permeabilidade é proporcional ao quadrado do diâmetro da partícula do elemento filtrante, ou seja, quanto menor o valor de  $k$ , maior será a perda de carga. Logo, a queda de pressão no leito é altamente dependente do tamanho da partícula.

O perfil de pressão através do filtro não apresenta muita variação para as diferentes velocidades do gás, pois apenas os valores de pressão na entrada do filtro se alteram. Por este motivo optou-se por apresentar apenas um perfil, que representa, de forma genérica, a variação desta variável através da seção do filtro para qualquer velocidade empregada.

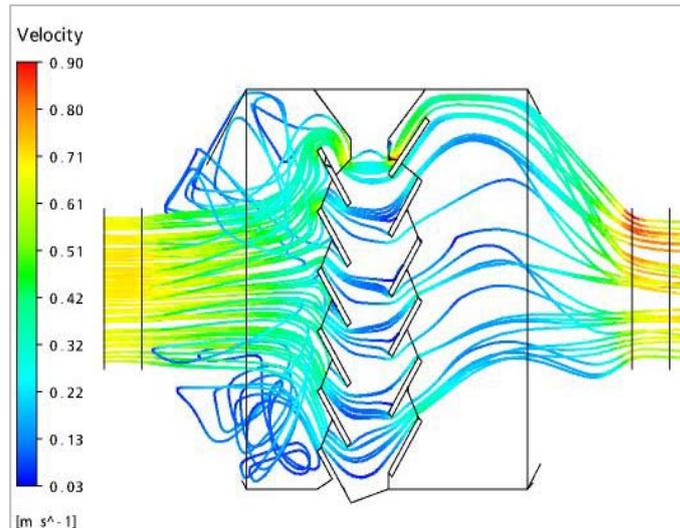
### **6.2.3 Linhas de Corrente e variação da velocidade**

A investigação sobre a velocidade de entrada do gás no filtro e a distribuição do mesmo através da face do leito é um assunto que causa interesse entre os pesquisadores, como é o caso de HSU *et al.* (2010). Em seu trabalho experimental, os autores realizaram testes de filtração à frio através de um leito granular fixo, testando variações de comprimento e ângulos para chicanas localizadas antes do leito com o objetivo de melhorar a distribuição do gás.

O modelo de filtro estudado pelos autores é bem próximo ao estudado neste trabalho, porém o leito é formado por sílica de 2 a 4 mm de diâmetro e possui apenas duas seções de venezianas. Sem a utilização de elementos corretivos na entrada do leito ocorria a formação de zonas estagnadas e uma baixa taxa de utilização do meio filtrante em algumas regiões.

Com o resultado dos testes os autores concluíram que tanto o comprimento quanto o ângulo dos elementos corretivos influenciam na distribuição do gás pelo sistema filtrante. Um parâmetro ótimo de comprimento e inclinação das chicanas foi obtido por eles na conclusão do estudo.

A trajetória do ar dentro do filtro foi expressa em função da velocidade deste e pode ser observada pelo corte no plano XY. Optou-se por apresentar apenas o resultado para uma das velocidades empregadas nas simulações, pois seria a mais significativa. A Figura 6.7 apresenta o resultado das linhas de corrente para a velocidade de  $0,3 \text{ m.s}^{-1}$  e permeabilidade de  $2,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .



**Figura 6. 7:** Linhas de corrente no filtro para velocidade  $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e para  $k$  igual a  $2,8 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ .

Analisando as linhas de corrente de gás na Figura 6.7 percebe-se que existe uma redução significativa da velocidade do ar ao ingressar na região cônica, que se deve ao aumento de área. Porém esta redução logo é recuperada no momento que o ar atravessa a região do leito, devido à presença das venezianas, ocorre uma redução de velocidade em cada ponto de entrada do leito.

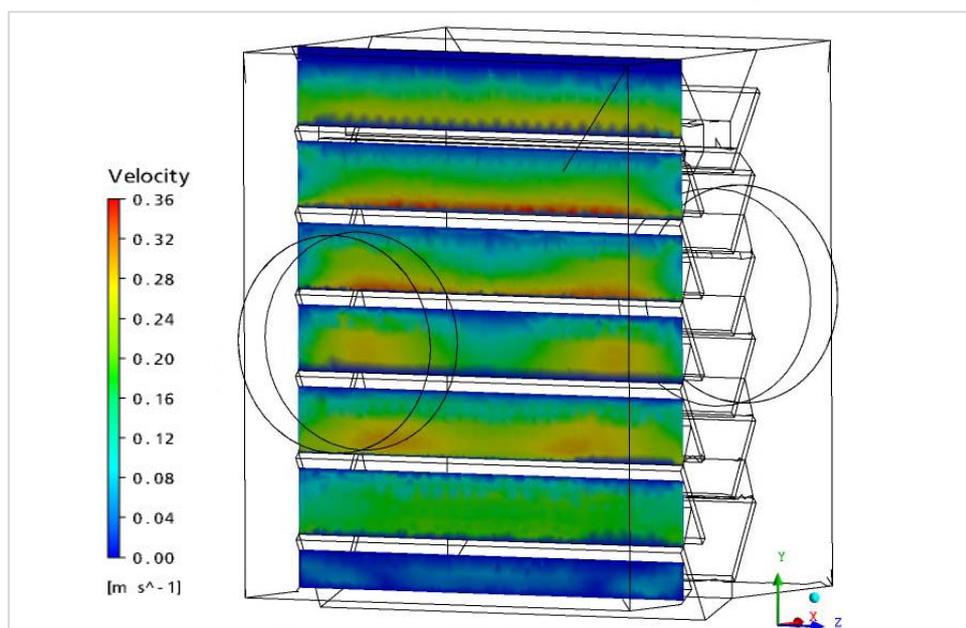
É possível observar também a presença de uma região de recirculação da corrente de ar anterior ao leito. Esta zona de recirculação e turbulências, quando formada antes do leito pode ocasionar alguns efeitos não desejados, como a redução da velocidade do gás, diminuindo a entrada de ar neste ponto do leito. Ao ser considerada a injeção de particulados no sistema do filtro, a presença dos vórtices deverá ser averiguado com mais cautela, já que uma recirculação de particulados acarretaria em um acúmulo de partículas e aumento progressivo da torta nesta região, aumentando, assim, a perda de carga, obrigando uma parada antecipada para limpeza do meio.

É importante salientar que mesmo com a formação dos vórtices de grande intensidade ao se aplicar a velocidade de  $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no ventilador, estes não contribuíram para a perda de carga total. Conforme a Figura 6.6, a distribuição da pressão é bem uniforme na região onde se formam os vórtices em todos os casos.

Um filtro com geometria semelhante ao utilizado por HSU *et al.* foi objeto de estudo realizado por PORCIÚNCULA *et al.* (2010). Devido uma maior diferença entre a área de entrada do gás no filtro e a área do leito, em comparação com o filtro de HSU *et al.*, os autores observaram uma formação intensa de vórtices na região central do leito, fator que poderia prejudicar a operação do filtro com o passar do tempo, pela má distribuição da torta em alguns pontos do leito, o que não se verifica para a geometria estudada nesta

dissertação.

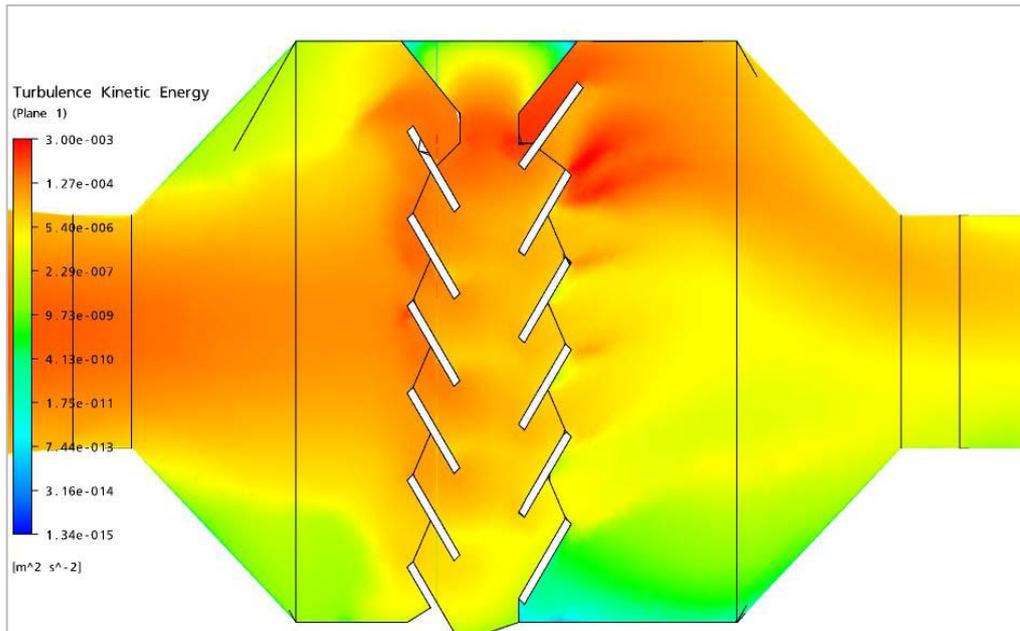
Através do plano de corte localizado a 290 mm da entrada do filtro é possível visualizar de maneira mais clara a variação de velocidade na superfície do leito, conforme mostra a Figura 6.8.



**Figura 6. 8:**Variação da velocidade em um plano localizado no interior do filtro a 290 mm da entrada.

É possível perceber a diferença na intensidade da velocidade na região central do leito e na região inferior. A região central apresenta pontos de maior velocidade comparada à região inferior do leito, resultado da formação de vórtices na região inferior.

O efeito da formação de vórtice e recirculação pode ser visualizado através da distribuição da energia cinética turbulenta (variável  $k$  do modelo  $k-\omega$ ) onde, as zonas de turbulência podem ser verificadas de maneira mais clara, conforme mostra a Figura 6.9.



**Figura 6. 9:** Distribuição da energia cinética turbulenta através do filtro.

As regiões onde a energia cinética turbulenta é maior são as regiões em vermelho e laranja, onde a velocidade também é alta. As regiões de vórtice, apesar de aparentemente não apresentarem um valor de energia cinética muito elevado, devido à baixa velocidade, são regiões de alto impacto e que apresentam um valor de energia cinética turbulenta considerável.

## Capítulo 7

# Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

O principal objetivo do presente trabalho foi avaliar a perda de carga em um filtro granular, através da simulação numérica e de procedimentos experimentais em escala de bancada, cujos resultados foram comparados entre si. Além da perda de carga foram avaliadas também a velocidade do gás no leito e a permeabilidade hidráulica do leito.

A partir dos resultados das simulações, é possível afirmar que a simulação computacional se mostra uma ferramenta importante no estudo de escoamentos em leitos granulares, principalmente na verificação do fenômeno físico e no estudo da geometria. Neste estudo utilizou-se o modelo de turbulência  $k-\omega$ , que apresentou boa convergência para o problema. Assim como o modelo escolhido, pode se afirmar que a malha escolhida apresentou um refinamento adequado aliado a uma rápida convergência.

Apesar da facilidade da conversão, os resultados computacionais obtidos neste trabalho não foram tão precisos, apresentando um desvio em torno de 37% nas simulações com o  $k$  teórico e 85% em relação às simulações com  $k$  experimental. A principal justificativa está no emprego da Lei de Darcy e nas simplificações feitas no modelo, utilizadas no Software ANSYS<sup>®</sup> CFX 11.0, para descrever escoamentos em meios porosos. Esta lei não se mostrou eficiente para o problema estudado por não considerar algumas variáveis de grande importância deste fenômeno, tais como a esfericidade e o diâmetro das partículas do leito.

Já os resultados experimentais de perda de carga se encontram dentro do intervalo esperados para este tipo de filtro, conforme as literaturas citadas. Além disso, a variação dos resultados de perda de carga do filtro em relação aos de vazão apresentaram comportamento quase linear para o caso estudado, ou seja, sem alimentação de particulados e sem a formação de torta. Os valores de desvio padrão para os resultados de

perda de carga estão dentro do intervalo aceitável, apresentando um crescimento com o aumento da vazão de gás.

A partir dos resultados obtidos até este momento é possível afirmar que este modelo de filtro de leito fixo granular pode ser empregado na indústria com grande eficiência de coleta. Cabe ressaltar, ainda, que devem ser feitos testes de injeção de particulados na corrente gasosa a fim de avaliar a retenção mecânica dos mesmos quando se utiliza este tipo de filtro granular.

## **Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, sugere-se testar outros meios filtrantes, tanto para fins de comparação da perda de carga quanto para avaliação da facilidade de operação de equipamento tais como alimentação, limpeza, etc. Outro aspecto importante refere-se a uma avaliação econômica do processo visando à futura aplicação na indústria.

Também como sugestão para trabalhos futuros seria importante a realização de um estudo de retenção de particulados oriundo da queima do carvão mineral brasileiro e um estudo de leitos reativos visando a neutralização de gases ácidos, resultados estes que associados aos do presente trabalho serão de grande relevância para a captação de poluentes industriais.

Sugere-se ainda, para fins de comparação dos resultados computacionais, a realização de estudos utilizando outros softwares de CFD para a mesma geometria deste problema.

## Referências Bibliográficas

- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição, 2009. Disponível, em: [http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1687](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1687)>. Acesso em: 23 de março de 2010.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – Banco de Informações de Geração – BIG. Disponível em: [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)>. Acesso em 24 de março de 2010.
- ANSYS® CFX 11.0 MANUAL. ANSYS, Inc. 2006.
- ASME MFC - 3M. *Measurement of fluid flow in pipes using orifice, nozzle and venturi tubes insert in circular cross-section conduites running full*. (Revisão de 1989), 2004.
- BEKER, J. *Intégration des équations du mouvement d'un fluide visqueux incompressible*. Handbuch der Physik (*Flügge, S., Ed.*), v. VIII/2, Springer-Verlag, Berlin, 1963. p.384
- BIZZO, W.A. *Purificação do produto de gaseificação de biomassa*. In: SÁNCHEZ, C.G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. p. 394-422.
- BP. *BP Statistical Review of World Energy June 2011*. Londres: BP Statistical Review, 2011. Disponível em: <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=7500&contentId=7068481>>, acesso em 03 de agosto de 2011.
- BROWN, C.R.; SHI, H.; COLVER, G.; SOO, S.C. *Similitude study of a moving bed granular filter*. **Powder Technology**, v.138, p. 201-210. 2003.
- CARMAN, P.C. *Fluid flow through granular beds*. **Trans Inst ChemEng**, 15, p.150-166. 1937.
- CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. *Cake formation and growth in cake filtration*. **Powder Technology**, v. 192, p. 217-224. 2009a.
- CHEN, Y. S.; HSIAU, S. S. *Influence of filtration superficial velocity on cake compression and cake formation*. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, p. 988-006. 2009b.
- CHEN, S.; HSIAU, S., LAI, S., CHYOU, Y., LI, H. e HSU, C. *Filtration of dust particulates with a moving granular bed filters*. **Journal of Hazardous Materials**, v. 171, p. 987-994.

2009.

CHILDRESS, J. M. *Senate Environment and Public Works Subcommittee on Clean Air, Wetlands and Climate Change - Gasification Technologies Council*. EUA, 2002. Disponível em: <<http://www.bric.com/news/o-caminho-do-carv%C3%A3o-para-um-futuro-limpo.html>> e <[http://epw.senate.gov/107th/Childress\\_01-29-02.pdf](http://epw.senate.gov/107th/Childress_01-29-02.pdf)>. Acesso em: 07 de abril de 2011.

CHOU, C.S.; CHEN, S.H. *Moving granular filter bed of quartz sand with louvered-walls and flow-corrective inserts*. **Powder Technology**, v.172, p. 41-49. 2007.

DESCHAMPS, C. J. *Modelos Algébricos e Diferenciais*. In: FREIRE, A.P.S. et al. **Turbulência: Anais da I Escola de Primavera em Transição e Turbulência - 1998**. Rio de Janeiro: ABCM, 2002.

DEUSCHLE, T.; JANOSKE, U.; PIESCHE, M.A *CFD-model describing filtration, regeneration and deposit rearrangement effects in gas filter systems*. **Chemical Engineering Journal**, v.135, p.49-55. 2008.

DITTLER, A.; KASPER, G. *Simulation of operational behavior of patchily regenerated, rigid gas cleaning filter media*. **Chemical Engineering and Processing**, v.38, p.321-327, 1999.

ERGUN, S. *Fluid flow through packed columns*. **Chem. Eng. Prog.**, 48, p.89-94. 1952.

FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H. *Fundamentals of air pollution engineering*. Nova Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1988. Disponível em: <<http://resolver.caltech.edu/CaltechBOOK:1988.001>> Acesso em: 02 de abril de 2011

FLOWSERVE, C. *Power Generation – IGCC*. Flowserve Corporation, 2009. Disponível em: <<http://www.flowserve.com/Industries/Power-Generation/IGCC>>. Acesso em: 06 de agosto de 2011.

FOTOVATI, S.; HOSSEINI, S.A.; TAFRESHI, H.V.; POURDEYHIMI, B. *Modeling instantaneous pressure drop of plated thin filter media during dust loading*. **Chemical Engineering Science**, Article in press. 2011.

FREIRE, A. P. da S.; MENUT, P. P. M.; SU, J. *Turbulência: Anais. Escola de Primavera em Transição e Turbulência*. Rio de Janeiro, RJ: ABCM, 2002.

GAVRONSKI, J. D. *Carvão Mineral e as Energias Renováveis no Brasil*. Porto Alegre, RS, 2007. 290f. (Tese de Doutorado). Escola de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS.

HSIAU, S.S., SMID, J., TSAI, F.H.; KUO, J.T.; CHOU, C.S. *Placement of flow-corrective elements in a moving granular bed with louvered-walls*. **Chemical Engineering and Processing**, v. 43, p. 1037-1045, 2004.

HSIAU, S. S.; SMID, J.; TSAI, S. A.; TZENG, C. C.; YU, Y. J. *Flow of filter granules in moving granular beds with louvers and sublouvers*. **Chemical Engineering and**

**Processing – Process Intensification**, v. 47, p.2084-2097. 2008.

HSU, C.; HSIAU, S.; CHEN, S.; SMID, J. *Investigation of the gas inlet velocity distribution in a fixed granular bed filter*. **Advanced Powder Technology**, article in press, 2010.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Data base section: Integrated gasification combined cycle (IGCC)*. Londres, 2011. Disponível em: <<http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies>>. Acesso em: 09 de agosto de 2011.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Key World Energy Statistics 2010*. França: OECD/IEA, 2010. Disponível em:<[http://www.iea.org/publications/free\\_new\\_Desc.asp?PUBS\\_ID=1199](http://www.iea.org/publications/free_new_Desc.asp?PUBS_ID=1199)>. Acesso em: 06 de abril de 2011.

IEA/ CIAB- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY/ COAL INDUSTRY ADVISORY BOARD. *Power Generations from Coal - Measuring and Reporting, Efficiency Performance and CO2 Emissions*. França: OECD/ IEA, 2010.

KATZER, J.; *et al.* *The Future of coal – Options for a carbon constraint world, An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 2007. Disponível em: <<http://web.mit.edu/coal/>>. Acesso em: 24 de agosto de 2011.

KOLMOGROV, A.N. *Surl'estimation statistique des paramètres de La loi de Gauss*. **Bull. Acad. Sci. URSS. SérMath.** p. 3-32, 1942.

KOZENY, J. *Ueber kapillare Leitung des Wassers im Bodem*. **Stizungsber Akad Wiss Wien**, 136, p.271-306. 1927.

KUO, Y., HUANG, S., LIN, W., HSIU, M. e CHEN, C. Filtration and loading characteristics of granular bed filters. *Journal of Aerosol Science*, v. 41, p. 223-229. 2010.

L9.222. Dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão dos gases. CETESB, 1992.

L9.224. Dutos e Chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade dos efluentes. CETESB, 1993.

L9.225. Dutos e Chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado. CETESB, 1990.

LI, H.; JI, Z.; WU, X.; CHOI, J.H. *Numerical analysis of flow field in the hot gas filter vessel during the pulse cleaning process*. **Powder Technology**, v.173, p.82-92. 2007.

MALISKA, C.R. *Transferência de Calor e mecânica dos Fluidos Computacional-Fundamentos e Coordenadas Generalizadas*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002. p.70-73.

- MAURSTAD, O. *An Overview of Coal based Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Technology*, MIT LFEE 2005-002 WP, Massachusetts Institute of Technology-Laboratory for Energy and the Environment. Cambridge, 2005.
- MENTER, F.R. *Multiscale model for turbulent flows*. 24th Fluid Dynamics Conference. American Institute of Aeronautics and Astronautics. EUA, 1993.
- MME - MINISTÉRIO MINAS E ENERGIA. BRASIL. Disponível em: <<http://mme.gov.br>>. Acesso em 25 de março de 2010.
- MME, EPE- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA E EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2008-2017*. Rio de Janeiro: EPE, 2009. v.1. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PDEE/20091119\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/PDEE/20091119_1.pdf)>. Acesso em: 02 de março de 2010.
- MME, EPE- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA E EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: EPE, 2006. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/PNE/20070625\\_5.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20070625_5.pdf)>. Acesso em 25 de março de 2010.
- MME, EPE- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA E EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2019*. Brasília: EPE, 2010. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PDE2019\\_03Maio2010.pdf](http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/noticias/2010/PDE2019_03Maio2010.pdf)>. Acesso em: 04 de agosto de 2011.
- MOREIRA, R.M.; ANDERSON, S.L.F. *Capítulo VIII - Controle de Emissões*. In: NOGUEIRA, M.F.M.; et al. **III Escola de Combustão: Conversão de resíduos sólidos em energia**. Salvador, BA: Rede Nacional de Combustão, 2011. p. 183-207.
- NBR 10701. *Determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias*, ABNT, 1989.
- NEIVA, A.C.B.; GOLDSTEIN, L. *A procedure for calculating pressure drop during the build-up of dust filter cakes*. **Chemical Engineering and Processing**, v.42, p.495-501. 2003.
- NETL – NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY. *The 2010 Worldwide Gasification Database*. DOE/NETL, EUA, 2010. Disponível em: <<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/worlddatabase/index.html>>. Acesso em: 01 de agosto de 2011.
- PERRY, R. H. GREEN, D. H. *Chemical Engineers Handbook*, 7<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, 1999.
- PORCIÚNCULA, C.B.; MARCÍLIO, N.R.; GODINHO, M.; SECCHI, A.R. *Simulação Fluidodinâmica de filtro seco para remoção de particulados à baixa temperatura*. **XVIII COBEQ – Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. 2010.
- REDDY, R.K.; JOSHI, J.B. *CFD modeling of pressure drop and drag coefficient in fixed and expanded beds*. **Chemical Engineering Research and Design**, v.86, p.444-543. 2008.
- SCHLICHTING, *Boundary-layer theory*. 7<sup>a</sup>ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1979.

- SHAW, C.T.; Using *Computational Fluid Dynamisc*. Reino Unido: Prentice Hall International Ltda, 1992.
- SEE – SECRETARIA DE ENERGIA ELÉTRICA – Departamento de monitoramento do sistema elétrico. Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro. Boletim de janeiro de 2010.
- STANGHELLE, D.; SLUNGAARD, T.; SONJU, O.K. *Granular bed filtration of high temperature biomass gasification gas*. **Journal of Hazardous Materials**, v.144, p.668-672. 2007.
- STEVENSON, D.G. *Flow and filtration through granular media – The effect of the grain and particle size dispersion*. **Wat.Res.**, v.31, n.2, p.310-322. 1997.
- SUTHERLAND, K. *Filters and Filtration Handbook*. 5ª ed. Burlington, USA: ELSEVIER LTD, 2008. p. 369 - 481.
- TANTHAPANICHAKOON, W.; CHARINPANITKUL, T.; JINTAWORN, W.; LAKSAMEEARUNOTAI, J.; AMORNKITBAMRUNG, M.; FUKUI, T.; YOSHIKAWA, M.; NAITO, M. *CFD investigation of high-temperature gas filtration using twin ceramic candles*. **Powder Technology**, v. 180, p.245-252. 2008.
- TEIXEIRA, E. C.; SANTANA, R. R. *Poluição atmosférica associada ao uso do carvão no Brasil*. In: SOARES, P. S. M. **Carvão Brasileiro: Tecnologia e meio Ambiente**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.
- TIEN, C.; RAMARAO, B.V. *Granular Filtration of Aerosols and Hydrosols*. 2ª Ed. New York, USA: Elsevier Science & Technology Books, 2007. p. 494.
- TISSOT, R.C.M.; MISSEL, R.L. *Tratamento dos Efluentes Atmosféricos da UTE Charqueadas*. In: **III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**, Gramado, RS, 2011.
- VERSTEG, H. K.; MALALASKERA, W. *An Introduction to computational fluid dynamics: The finite method*. Harlow, Inglaterra: Longman, 1996, 1995.
- WCI – WORLD COAL INSTITUTE. Disponível em: <[www.worldcoal.org](http://www.worldcoal.org)>. Acesso em 07 de abril de 2010.
- WCI- WORLD COAL INSTITUTE. *The Coal Resource- A comprehensive Overview of Coal*. Londres: WCI, 2005. Disponível em: <<http://www.worldcoal.org/resources/wca-publications/>>. Acesso em 06 de abril de 2010.
- XU, P.; YU, B. *Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry*. **Advanced in Water Resources**, v. 31, p. 74-81. 2008.
- YANG, G.H.; ZHOU, J.H. *Experimental Study on a new dual-layer granular bed filter for removing particulates*. **Journal of China University of Mining and Technology**, v.17, p.201-204. 2007.

ZHAO, J.; HUANG, J.W.; FANG, Y.; WANG, Y. *Modeling and optimization of the moving granular bed for combined hot gas desulfurization and dust removal*. **Powder Technology**, v.180, p.2-8. 2008.

ZIMMER, L. *Projeto, construção e calibração de um dosador de poeira para ensaios de elementos filtrantes*. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

## Apêndice A

# Tecnologias Limpas na geração de energia a partir do carvão

Mesmo que as fontes renováveis de energia, como a biomassa, solar e eólica, estejam ocupando uma maior parcela na matriz energética mundial, o carvão deverá continuar sendo o principal insumo para a geração de energia elétrica por muitas décadas, especialmente em países em desenvolvimento (IEA/CIAB, 2010). Para que isso ocorra é necessário atender pontos importantes, como melhorar a eficiência de conversão, reduzir impactos ambientais (emissão de gases poluentes) e aumentar a competitividade comercial desta matriz. E é em relação à produção de energia elétrica, que ocorrem grandes investimentos de P&D (pesquisa e desenvolvimento), focados na redução de impurezas, diminuição de emissões de gases contendo nitrogênio e enxofre (NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub>) e redução da emissão de CO<sub>2</sub> por meio da captura e armazenamento de carbono.

As “tecnologias limpas do carvão” (*Clean Coal Technologies* – CCTs) são uma gama de opções tecnológicas que melhoram o desempenho do uso do carvão sob o ponto de vista ambiental. Essas tecnologias visam à redução das emissões e a redução do desperdício e aumento da quantidade de energia produzida para cada tonelada de carvão queimado.

Existem tecnologias diferentes para cada tipo de carvão e para cada problema ambiental que se queira mitigar. A escolha da tecnologia também pode depender do nível de desenvolvimento econômico do país em questão. Tecnologias mais caras e mais avançadas podem não ser muito adequadas para países em desenvolvimento, onde, opções disponíveis mais baratas, podem trazer um benefício maior além de serem mais adequadas sob a ótica do meio ambiente.

Os principais problemas e as medidas a serem tomadas visando à redução dos impactos ambientais relacionados com a queima do carvão são as seguintes:

### **(a) Redução das Emissões de Particulados**

Emissões de particulados, tais como cinzas, tem sido um dos mais visíveis efeitos secundários da combustão de carvão no passado. Eles podem afetar a visibilidade local, causar problemas de poeira e afetar o sistema respiratório das pessoas. Existem, atualmente, tecnologias para reduzir e até eliminar a emissão de particulados como:

#### 1) Limpeza/ Beneficiamento do Carvão

A limpeza do carvão, também chamada como beneficiamento ou preparação do carvão, aumenta o poder calorífico e a qualidade do carvão, diminuindo assim, os níveis de enxofre e materiais minerais. O teor de cinzas do carvão pode ser reduzido em mais de 50%, ajudando a reduzir o desperdício e a geração de resíduos durante a combustão do carvão. Este é um ponto importante a ser considerado, principalmente, em países onde o carvão é transportado por longas distâncias antes de ser utilizado, gerando uma economia no transporte, pois a maior parte do material não combustível terá sido removida.

O beneficiamento do carvão também aumenta a eficiência das centrais elétricas alimentadas a carvão, o que leva a uma redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

#### 2) Limpeza Mecânica: Precipitadores Eletrostáticos e Filtros

Partículas oriundas da combustão do carvão podem ser abatidas por precipitadores eletrostáticos e filtros de mangas ou cerâmicos. Ambos têm a capacidade de remoção das emissões em torno de 99,5%, e são amplamente aplicados tanto em países desenvolvidos quanto em países em desenvolvimento.

Nos precipitadores eletrostáticos, as partículas transportadas pelos gases de combustão, passam entre as placas coletoras, onde um campo elétrico cria carga sobre essas partículas, o que as atrai para as placas coletoras onde se acumulam e são posteriormente descarregadas.

Os filtros de tecidos, também conhecidos como filtros de mangas, são uma alternativa de limpeza mecânica, pois realizam a coleta de partículas do gás de combustão em um tecido firme através do processo de filtração.

O uso de equipamentos de controle de partículas tem grande impacto sobre o desempenho ambiental das estações a carvão. Na estação de energia de Lethabo, na África do Sul, precipitadores eletrostáticos removem 99,8% de cinzas, sendo que parte destas, são vendidas para indústrias de cimento. Nesta usina, as emissões foram reduzidas em 85%

de 1988 para 2003 e a energia gerada aumentou mais de 56% no mesmo período com o emprego dos precipitadores eletrostáticos (WCI, 2005).

### **(b) Prevenção da Chuva Ácida**

A chuva ácida é atribuída a uma série de fatores como a drenagem ácida de áreas degradadas e as emissões oriundas da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia. Os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_x$ ) e nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) são emitidos em diferentes graus durante a combustão de combustíveis fósseis. Esses gases reagem quimicamente com o vapor d'água e outras substâncias presentes na atmosfera, formando ácidos que irão se depositar nas chuvas.

Algumas medidas foram tomadas para reduzir significativamente as emissões de  $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$  gerados nas usinas a carvão (dessulfuração de gases e melhoria dos queimadores). Algumas destas medidas possuem um benefício adicional como a redução das emissões de mercúrio.

O enxofre está presente na estrutura do carvão como uma impureza e reage com o ar durante a queima do carvão formando  $\text{SO}_x$ . Em contraste,  $\text{NO}_x$  é formado na queima com o ar, a partir de qualquer combustível fóssil. Em muitas circunstâncias o uso do carvão com baixo teor de enxofre é a maneira mais econômica para controlar a emissão de  $\text{SO}_x$ . Além disto, uma alternativa tem sido o desenvolvimento da dessulfuração dos gases de combustão (FGD) utilizando sistemas de absorção de  $\text{SO}_x$  com calcário.

Os sistemas de dessulfuração dos gases são, muitas vezes, referidos como "purificadores" e podem remover até 99% das emissões de  $\text{SO}_x$ . Os óxidos de nitrogênio podem contribuir para a poluição atmosférica e também para a formação da chuva ácida. A emissão de  $\text{NO}_x$  da combustão do carvão pode ser reduzida através do uso de queimadores de "baixo  $\text{NO}_x$ ", ou seja, realizando melhorias no projeto dos queimadores e aplicando tecnologias que tratem o  $\text{NO}_x$  na exaustão do fluxo de gás. A redução catalítica seletiva (RCS) e a redução não-catalítica seletiva (RNCS) são tecnologias que podem reduzir as emissões de  $\text{NO}_x$  em cerca de 80-90%, pois trata o  $\text{NO}_x$  pós-combustão.

A combustão em leito fluidizado (FBC) possui grande eficiência, como uma tecnologia avançada de redução das emissões de  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ , chegando a valores de redução próximos a 90% ou até maiores. Em sistemas FBC, o carvão é queimado em um leito aquecido de partículas em suspensão com um fluxo de ar. Em altas velocidades de ar, o leito funciona como um fluido, resultando na mistura rápida das partículas, sendo que a fluidização permite a combustão completa das partículas a temperaturas relativamente

baixas.

O processo IGCC a carvão permite as menores emissões de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), NO<sub>x</sub> e materiais particulados do que qualquer outro sistema de geração de energia baseado em carvão. Uma termelétrica utilizando o processo IGCC é capaz de conseguir baixas taxas de emissão atmosférica, que se aproximam das de uma usina a gás natural com ciclo combinado (NGCC). Além disso, as emissões de mercúrio podem ser removidas de uma usina IGCC a um décimo do custo de remoção de uma usina de queima de carvão convencional. A tecnologia existente atualmente permite remover mais de 95 por cento do mercúrio gerado em uma usina que utiliza o processo IGCC (CHILDRESS, 2002).

### ***(c) Emissões de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)***

Um dos grandes desafios ambientais que o mundo enfrenta atualmente é o risco do chamado “aquecimento global”. Gases de ocorrência natural na atmosfera ajudam a regular a temperatura da terra, interceptando outros tipos de radiação – fenômeno conhecido como efeito estufa. As atividades humanas, como a queima de combustíveis fósseis, geram uma produção adicional de gases de efeito estufa (GEE), os quais se acumulam na atmosfera. Os cientistas acreditam que o acúmulo desses gases na atmosfera está causando o efeito estufa, aumentando, assim, o aquecimento global e as mudanças climáticas. Os principais gases causadores do efeito estufa são: o vapor d’água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonos, perfluorcarbonos e hexafluoretos de enxofre.

A mudança global do clima causada pelas emissões antrópicas de gases de efeito estufa (GEE) tem sido incluída na pauta dos principais problemas socioambientais a serem enfrentados ao longo deste século. O Brasil, signatário da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (CQNUMC), não dispõe de metas quantitativas para a redução das emissões de gases de efeito estufa, no âmbito do Protocolo de Quioto, no qual os países desenvolvidos se comprometem a atingir, entre o período de 2008 a 2012, níveis de emissões 5% inferiores aos de 1990 (MME, 2010).

Apesar de não estar vinculado ao compromisso de redução das emissões, o Brasil, assim como os demais países signatários da CQNUMC, tem empreendido esforços na mitigação dessas emissões, com o objetivo de estabilizar a concentração de GEE na atmosfera, princípio básico da Convenção. Na Conferência das Partes (COP-15), realizada em Copenhague, em dezembro de 2009, o Brasil se comprometeu, de forma voluntária, a reduzir entre 36,1 e 38,9% das suas emissões totais de GEE até 2020. Como formalização deste compromisso foi estabelecida a Política Nacional sobre Mudança do Clima (MME, 2010).

O carvão é uma das muitas fontes de emissões de gases de efeito estufa gerados pelas atividades humanas e as indústrias consumidoras deste combustível estão empenhadas em minimizar suas emissões. Os gases de efeito estufa associados ao carvão incluem metano, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). O metano é liberado durante a etapa da mineração do carvão de profundidade. O  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$  são liberados quando o carvão é utilizado na geração de energia, ou em processos industriais, como a produção de aço e na fabricação de cimento.

As medidas de redução de  $\text{CO}_2$  serão listadas a seguir:

a) Eficiência de combustão

Um passo importante na redução das emissões de  $\text{CO}_2$  provenientes da queima do carvão tem registrado melhorias na eficiência térmica das usinas de geração. A eficiência térmica é uma medida de eficiência global de conversão do combustível no processo de geração de energia. Quanto maior o nível de eficiência, maior a energia que está sendo produzida a partir do combustível.

A eficiência média global das centrais térmicas à carvão no mundo é de, aproximadamente, 30%. A China tem uma eficiência térmica média em toda sua capacidade instalada em torno de 27% (embora exista um aumento no número de instalações de novas centrais com eficiências bem superiores às antigas) (WCI, 2005).

A nova tecnologia “supercrítica” permite que as plantas a carvão possam atingir uma eficiência térmica global de 43-45%. Esses níveis mais elevados são possíveis porque a planta supercrítica opera em valores de temperaturas e pressões de vapor mais altas que as plantas convencionais. Usinas com plantas ultra-supercríticas podem alcançar níveis de eficiência de até 50%, operando em temperaturas e pressões ainda mais elevadas. Mais de 400 plantas em todo o mundo estão operando com a tecnologia de queima supercrítica, incluindo países em desenvolvimento.

Outro método alternativo é o IGCC. No IGCC, como explicado anteriormente (Capítulo 2) a queima do carvão não é direta, pois ele reage com o oxigênio e vapor d'água para a produção do gás de síntese, composto, principalmente, de monóxido de carbono e hidrogênio. O gás de síntese é limpo de impurezas e, então, é queimado na turbina para a geração de eletricidade e produção de vapor para o ciclo de energia a vapor.

Sistemas IGCC também oferecem um potencial futuro para a produção de hidrogênio, relativo à captura de carbono e tecnologias de armazenamento de  $\text{CO}_2$ .

## b) Captura e Armazenamento/Sequestro de Carbono

Um fator importante para a utilização do carvão no futuro será o nível em que as emissões de CO<sub>2</sub> podem ser reduzidas. Muito tem sido feito para alcançar este objetivo, tais como, as melhorias nos níveis de eficiência dos processos de tratamento térmico e dos equipamentos. Outra opção muito promissora é a captura e armazenamento de carbono (CCS).

A captura de carbono e as tecnologias de armazenamento permitem que as emissões de dióxido de carbono sejam retiradas do fluxo de exaustão da combustão do carvão ou gaseificação e dispostos de tal maneira que elas não entrem na atmosfera. As tecnologias que permitem a captura de CO<sub>2</sub> a partir de fluxos de emissão têm sido usadas há muitos anos para produzir o CO<sub>2</sub> puro para o uso no processamento de alimentos e na indústria química. Já as companhias petrolíferas, muitas vezes, separam o CO<sub>2</sub> do gás natural antes de ser transportado para o mercado através de oleodutos. Algumas iniciaram o armazenamento subterrâneo profundo permanente de CO<sub>2</sub> em aquíferos salinos.

Embora o desenvolvimento adicional das tecnologias seja necessário para se ter uma maior viabilidade na separação do CO<sub>2</sub> de um volume grande de gases gerados, a fim de manter baixas concentrações de CO<sub>2</sub> na combustão das centrais termoelétricas a carvão, torna a captura de carbono uma opção realista para o futuro. E uma vez que o CO<sub>2</sub> foi capturado, é essencial que ele possa ser armazenado de forma segura e permanente. Há uma série de opções de armazenamento em vários estágios de desenvolvimento e aplicação.

O CO<sub>2</sub> pode ser, também, injetado no subsolo terrestre, uma técnica conhecida como armazenamento geológico. Esta técnica permite que grandes quantidades de CO<sub>2</sub> possam ser permanentemente armazenadas, além de ser a opção mais estudada. Desde que, o local de armazenagem seja cuidadosamente escolhido, o CO<sub>2</sub> pode ser armazenado por longos períodos e monitorado, para que se garanta que não haja vazamentos. O CO<sub>2</sub> é comprimido até um estágio de densidade elevada, antes de ser injetado no subsolo para o interior de um reservatório geológico natural.

As alternativas mais utilizadas para estes reservatórios são:

### *i) Jazidas Esgotadas de Petróleo e Gás Natural*

Os reservatórios de petróleo e gás já esgotados são uma importante opção para o armazenamento geológico, já que um campo de petróleo esgotado pode ter uma capacidade média de armazenamento de CO<sub>2</sub> de 126 gigatoneladas (Gt) e um reservatório

esgotado de gás natural, uma capacidade de armazenagem de 800 Gt de CO<sub>2</sub>. Existe também a opção de armazenamento em camadas não mineráveis de carvão, com uma capacidade de 150 Gt de CO<sub>2</sub> armazenados.

#### *ii) Jazidas Salinas*

Grandes quantidades de CO<sub>2</sub> podem ser armazenadas em reservatórios de rochas salinas, saturados de água, por centenas de anos, pois possuem uma capacidade de armazenamento estimada entre 400 e 10.000 Gt, porém ainda não totalmente comprovadas. Há alguns projetos que demonstram a eficácia do armazenamento de CO<sub>2</sub> em aquíferos salinos. O projeto *Nagakoda*, iniciado em 2002 no Japão, com duração de 5 anos, teve a intenção de pesquisar e demonstrar o potencial de armazenamento de CO<sub>2</sub> em aquíferos *on-shore* (em terra) e *offshore* (em alto mar) (WCI, 2005).

Neste processo de armazenamento, um milhão de toneladas de CO<sub>2</sub> por ano está sendo capturada do fluxo de gás natural pelo processo de absorção por solventes e injetados em reservatórios no fundo do mar. O gás é absorvido na água salina numa formação arenosa com 200 m de espessura, a aproximadamente 800 e 1000 m de profundidade.

#### *iii) Fundo dos Oceanos*

Os oceanos são os maiores depósitos de CO<sub>2</sub>. Dentro desta possibilidade, três alternativas estão sendo pesquisadas: a dispersão por encanamento fixo ou de navio e a formação de lagoa de CO<sub>2</sub> líquido no fundo do oceano. Nenhum obstáculo tecnológico foi identificado até o momento, mas os impactos ambientais precisam ser avaliados (GAVRONSKI, 2007).

#### *iv) Produção de Petróleo e Metano*

O armazenamento de CO<sub>2</sub> pode ter também benefícios econômicos, possibilitando o aumento da produção de petróleo e aumento da produção de metano oriundo da camada de carvão. Estas técnicas são chamadas como recuperação avançada de petróleo (EOR) e maior recuperação de metano da camada de carvão (ECBM). O CO<sub>2</sub> pode ser utilizado para empurrar o petróleo para fora do subsolo, como já vem sendo utilizado pelas indústrias petrolíferas.

A técnica ECBM permite o armazenamento de CO<sub>2</sub> em camadas não mineráveis de carvão, o que aumentaria a produção de metano desta mina, tornando-o um valioso produto. A captura e armazenagem de carbono oferecem um potencial de redução das emissões de CO<sub>2</sub> em larga escala, o que estabilizaria as concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub>.

O contínuo desenvolvimento e implantação das energias renováveis irão desempenhar um importante papel do ponto de vista ambiental na produção de energia no futuro. No entanto, ainda existe um número significativo de barreiras práticas e econômicas que limitam a taxa de desenvolvimento projetada das energias renováveis. A energia renovável pode ser intermitente ou imprevisível e "localmente dependente", o que significa que só estão disponíveis em locais específicos. A energia eólica, por exemplo, depende das condições climáticas e da força do vento, até mesmo nas melhores "fazendas de vento" não se opera continuamente por mais de um terço do tempo.

Além da energia eólica, muitas formas de biomassa são sazonais e de difícil transporte, por este motivo a geração de energia a partir do carvão pode ajudar no crescimento das energias renováveis, equilibrando as sazonalidades, fornecendo energia. O carvão poderá suprir a carga de energia básica de forma barata, enquanto que as energias renováveis poderiam ser usadas para atender a demanda de pico. A economia e a eficiência da biomassa, como energia renovável, também pode ser aprimorada através da co-incineração com carvão.

Conforme alguns estudos, como o de KATZER (2007), a captura de CO<sub>2</sub> em sistemas de IGCC mostra-se menos dispendiosa do que outros sistemas de geração a carvão. Isto se deve à possibilidade de remover CO<sub>2</sub> antes da combustão ao invés da corrente de exaustão. A vantagem disso se encontra no fato de a corrente de gás de síntese possuir um volume muito menor e apresentar concentrações de CO<sub>2</sub> (ou pressões parciais de CO<sub>2</sub>) mais altas do que as de uma corrente de exaustão de sistemas de combustão convencional. O aumento do custo e consumo interno de energia devido à captura de carbono em plantas de IGCC é, por isso, menor do que em plantas que utilizam soluções pós-combustão.

## Apêndice B

Conforme descrito no Capítulo 5, a metodologia utilizada para o cálculo da velocidade média do gás e da vazão volumétrica foi baseada nas Normas da CETESB, L9.222 (1992), L9.224 (1993) e L9.225 (1990) que serão detalhadas nesta seção.

Será descrito também a etapa de determinação dos pontos de tomada de velocidade no duto extensor, etapa anterior a de medição da velocidade no duto.

### **a) Determinação dos pontos de tomada de velocidade no duto**

Neste procedimento tomou-se como base a Norma da ABNT, NBR 10701 de 1999, que fixa condições para a determinação de pontos de amostragem em dutos e chaminés de fontes estacionárias.

Esta norma fixa as condições exigíveis para a determinação e localização dos pontos de amostragem e/ou tomada de velocidades, como neste caso, em uma seção transversal de dutos e chaminés de fontes estacionárias.

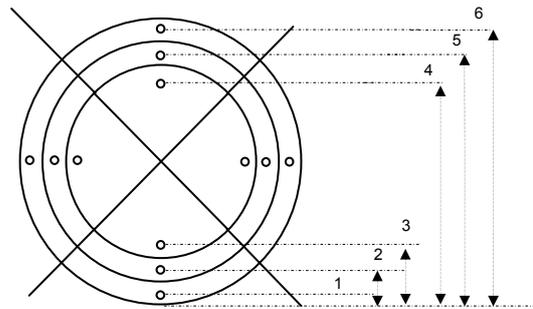
Para que fosse possível a aplicação desta norma, alguns requisitos tiveram de ser verificados anteriormente, como a exigência de que o fluxo do gás fosse ciclônico, ou seja, fluxo no qual as linhas não são paralelas ao eixo longitudinal do duto; seção transversal escolhida em trecho reto, com 8 diâmetros à jusante e 2 diâmetros à montante de singularidades.

Após conferidas estas imposições determinou-se a distribuição dos pontos através da seção transversal, neste caso de uma seção circular. O número de pontos de tomada de velocidade foi estipulado em função do diâmetro do duto e da exigência da multiplicidade por 4. Determinou-se, então, que o número de pontos seriam 12 no total, sendo 6 na vertical e 6 na horizontal. A distribuição destes pontos foi feita com a utilização de uma tabela, pertencente à norma, que fornece a percentagem do diâmetro para a disposição dos pontos.

A norma esclarece que para diâmetros de duto inferiores a 0,6m, a distância do ponto mais próximo à parede deve ser superior a 1,5 cm, ou no caso deste trabalho que o

diâmetro do duto é igual a 0,1 metros, a distância do ponto mais próximo da parede deve ser no mínimo igual ao diâmetro da boquilha do Tubo de Pitot utilizado.

A distribuição dos pontos de tomada de velocidade na seção transversal do duto pode ser vista na Figura B.1.



**Figura B. 1:** Esquema representativo da posição dos pontos de tomada de velocidade no duto.

Na Figura B.1 acima, os números representam a distância do ponto até a parede do duto. A Tabela B.1 a seguir mostra a porcentagem multiplicada pelo diâmetro do duto e a distância de cada ponto.

**Tabela B. 1:** Porcentagem do diâmetro e a distância de cada ponto de tomada de pressão em relação à parede do duto.

Ponto	% do diâmetro	Distância (cm)
1	4,4	0,4
2	14,7	1,5
3	29,5	3,0
4	70,5	7,0
5	85,3	8,5
6	95,6	9,6

Após a distribuição dos pontos de tomada de pressão procedeu-se conforme descrito no Capítulo 5 para a determinação da velocidade do gás na saída do duto. A rotina de cálculos será descrita na sequência deste apêndice.

### e) Velocidade do gás na saída do duto

A velocidade média do gás (ar) nas condições do duto é calculada conforme a Equação B.1.

$$u_{duto} = \sqrt{\Delta P} \sqrt{\frac{2}{\rho_{gás}}} \quad (\text{B. 1})$$

onde:

$u_{duto}$ : velocidade média do gás nas condições do duto ( $m.s^{-1}$ );

$\Delta P$ : variação da pressão do gás causada pela pressão de velocidade do gás (ar), medida no micromanômetro (em mm H<sub>2</sub>O) no interior do duto (Pa);

$\overline{\sqrt{\Delta P}}$ : média das raízes quadradas de  $\Delta P$  ( $Pa^{-1/2}$ );

$\rho_{gás}$ : massa específica do gás (ar) ( $g.m^{-3}$ ).

As equações a seguir são complementares para o cálculo da velocidade do gás.

$$\rho_{gás} = \frac{P_{abs} MM_{úmida}}{RT_{duto}} \quad (B. 2)$$

$$P_{abs} = P_{estática} + P_{brométrica} \quad (B. 3)$$

$$MM_{úmida} = MM_{seca} (1 - B_{ag}) + MM_{água} B_{ag} \quad (B. 4)$$

$$MM_{seca} = \left( \%_{vol} CO_2 \frac{MM_{CO_2}}{100} \right) + \left( \%_{vol} O_2 \frac{MM_{O_2}}{100} \right) + (100 - \%_{vol} O_2 - \%_{vol} CO_2) MM_{N_2} / 100 \quad (B. 5)$$

$$B_{ag} = \frac{U_{midrel}}{100} \times \frac{P_{v sat}}{P_{barom}} \quad (B. 6)$$

$$\ln P = C_1 + \frac{C_2}{T} + C_3 \ln T + C_4 T^{C_5} \quad (B. 7)$$

Conforme PERRY (1999), a Equação B.7 é válida para um intervalo de temperatura que pode variar de 273,16K no mínimo e 647,096 K no máximo.

Os valores das constantes empregadas na Equação B.7 são (PERRY, 1999):

$$C_1 = 73,649$$

$$C_2 = - 7258,2$$

$$C_3 = - 7,3037$$

$$C_4 = 4,165 \times 10^{-6}$$

$$C_5 = 2$$

$P_{abs}$ : pressão Absoluta no duto (Pa);

$P_{estática}$ : pressão medida através do Pitot no duto liberando o lado da pressão maior ( $P_1$ ),

para a leitura apenas da pressão estática no manômetro (lida em mm H<sub>2</sub>O e transformada para Pa);

$P_{barométrica}$ : pressão ambiente obtida através do medidor VAISALA (Pa), para cada teste realizado;

$MM_{úmida}$  : massa molar do gás em base úmida (g. mol<sup>-1</sup>);

$MM_{seca}$ : massa molar média do gás em base seca (g. mol<sup>-1</sup>), (PERRY, 1999);

$B_{ag}$  : umidade expressa como fração volumétrica de vapor d'água (m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O/ m<sup>3</sup> total (ar + H<sub>2</sub>O)).

$Umid_{rel}$ : Umidade relativa medida no laboratório através do medido VAISALA (%);

$P_{vsat}$ : pressão de vapor de saturação na temperatura e pressão do duto (Pa).

A velocidade no duto foi calculada em cada teste para cada frequência utilizada no ventilador. Com esses valores calculou-se, então a média da velocidade no duto para cada frequência.

### c) Vazão Experimental do Gás

Após o procedimento descrito acima, com os valores de velocidade do gás no duto, pode-se calcular a vazão nas condições do duto através da Equação B.8:

$$Q_{duto} = u_{duto} \times A_{duto} \quad (B. 8)$$

$Q_{duto}$ : vazão do gás nas condições do duto (m<sup>3</sup>. h<sup>-1</sup>);

$A_{duto}$ : área transversal do duto (m<sup>2</sup>).

Para comparação com dados da literatura, faz-se uso da vazão mássica, obtida pela multiplicação da vazão volumétrica nas condições do duto pela massa específica do gás.

$$q = Q_{duto} \times \rho_{gás} \quad (B. 9)$$

onde,  $q$  : vazão mássica do gás (kg.h<sup>-1</sup>).

## Apêndice C

Este apêndice irá apresentar a metodologia utilizada na calibração da placa de orifício instalada no sistema do filtro, os cálculos do coeficiente de descarga teórico e experimental, do coeficiente de expansividade e das vazões teórica (ASME MFC-3M, 2004), experimental e real.

Conforme explicado em detalhes no Capítulo 5 desta dissertação, com a placa de orifício determina-se, através da diferença de pressão, a vazão teórica para o sistema. Para se conhecer a vazão real, deve-se incluir na equação geral um coeficiente de correção, chamado de coeficiente de descarga ( $C_d$ ).

O coeficiente de descarga pode ser determinado experimentalmente como função de  $\beta_d$ , razão entre os diâmetros interno (da boquilha) e externo da tubulação, e do número de Reynolds.

Os valores típicos do coeficiente de descarga para placas de orifício, nas condições aconselhadas de aplicação ( $Re > 10000$ ) estão entre 0,6 e 0,7 (ASME MFC - 3M, 2004 e PERRY, 1999).

Conforme a norma americana ASME MFC - 3M de 2004, o coeficiente de descarga pode ser calculado conforme a Equação (C.1) a seguir.

$$C_d = 0,591 + 0,0261\beta_d^8 + 0,000521 \left( \frac{10^6 \beta_d}{R_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta_d^{3,5} \left( \frac{10^6}{R_D} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta_d^4}{1 - \beta_d^4} - 0,031(M'_2 - 0,8M'^{1,1}_2)\beta_d^{1,3} \quad (C. 1)$$

Onde

$\beta_d = d/D$  = razão entre os diâmetros, da placa (d) e da tubulação (D);

$R_D = \frac{4q_{exp}}{\pi D \mu}$  = número de Reynolds, relativo ao diâmetro da tubulação;

$q_{exp}$  = vazão experimental medida através do Pitot no duto ( $kg \cdot h^{-1}$ );

$L_1 = l_1/D$ , onde  $l_1$  é distância entre a tomada de pressão anterior a placa e a face frontal da placa e D é o diâmetro da tubulação;

$L'_2 = l'_2/D$ , onde  $l'_2$  é a distância da tomada de pressão posterior a placa e a face traseira da

placa.

$$M'_2 = \frac{2L'_2}{1 - \beta_d}$$

$$A = \left( \frac{19000\beta_d}{R_D} \right)^{0,8}$$

As correlações para o cálculo de  $C_d$  para as placas de orifício variam conforme a localização dos pontos de medida de pressão. A Equação (C.1) é válida somente para tomadas de pressão de canto, por flanges ou quando a distância entre ela é  $D$  e  $D/2$ .

Para o cálculo da vazão real, também é necessário conhecer o coeficiente de expansividade  $Y$  para escoamentos subsônicos ( $r_c < r < 1,0$ ) de gases (PERRY, 1999).

$$Y = 1 - \left[ \left( \frac{1-r}{K} \right) \right] (0,41 + 0,35\beta^4) \quad (\text{C. 2})$$

onde

$r = P_2/P_1$ , razão entre as pressões estáticas, posterior e anterior, à placa;

$K = C_p/C_v$ , razão entre os calores específicos à pressão constante e à volume constante (PERRY, 1999).

$\beta_d = d/D$ , razão entre os diâmetros do orifício da placa e da tubulação.

Conforme a Norma ASME, para escoamentos em que  $P_2/P_1 \geq 0,80$ , utiliza-se a Equação (C.3) para o cálculo do coeficiente de expansão:

$$Y = 1 - (0,351 + 0,256\beta_d^4 + 0,93\beta_d^8) \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/K} \right] \quad (\text{C. 3})$$

Em ambas as equações para  $Y$  os valores de  $P_1$  e  $P_2$  são relativos as pressões absolutas obtidas conforme descrito no Apêndice B pela Equação (B.3). A pressão estática antes do orifício, utilizada no cálculo da pressão absoluta, é medida pelo medidor de pressão quando se libera um dos lados do manômetro. A pressão estática após o orifício é resultado da diferença entre a pressão estática antes do orifício e o  $\Delta P$  da placa. Além desses, outro valor utilizado no cálculo de  $Y$  é o  $K$ , a razão entre os calores específicos. Este valor é obtido consultando o valor para o fluido, neste caso, ar para cada temperatura medida durante os experimentos (PERRY, 1999).

A vazão predita, ou real, é obtida através da Equação (5.4), utilizando os valores de  $C_d$  e  $Y$ , obtido na Equação (C.2) (ou (C.3)), dependendo do valor de  $r$ . Os valores de vazão predita serão comparados com os valores de vazão experimental do Pitot.

A obtenção do coeficiente de descarga pode ser feita através da Equação (C.1), como foi dito anteriormente, chamado de  $C_d$  teórico. Ou, também, de outra maneira, utilizando os resultados de vazão teórica (5.3) e vazão experimental (Pitot), através da relação descrita pela Equação (C.4). Este coeficiente é chamado de experimental, pois utiliza os resultados experimentais de vazão.

$$C_{d\text{exp}} = \frac{q_{\text{exp}}}{q_{\text{teórica}}} \quad (\text{C. 4})$$

A Tabela C.1 apresenta esses resultados de maneira resumida.

**Tabela C. 1:** Valores de vazão teórica, real experimental e os coeficientes de descarga teórico e experimental.

Freq	Testes								
	* Vazões	1	2	3	4	5	6	7	8
10 Hz	Teórica (placa)	90,6	85,0	92,1	94,0	92,3	92,0	86,6	90,4
	Exp (Pitot)	88,1	55,5	53,2	57,1	78,7	55,4	53,2	53,1
	$C_d$ teórico	0,703	0,706	0,707	0,706	0,704	0,706	0,707	0,707
	$C_{d\text{exp}}$	0,972	0,653	0,578	0,607	0,853	0,602	0,615	0,587
15 Hz	Teórica	152,5	133,5	151,6	154,4	152,4	150,8	143,6	150,9
	Exp	124,4	83,5	76,9	105,8	108,3	92,1	86,4	87,3
	$C_d$ teórico	0,702	0,704	0,704	0,702	0,702	0,703	0,703	0,7035
	$C_{d\text{exp}}$	0,816	0,625	0,507	0,685	0,711	0,611	0,602	0,579
20 Hz	Teórica	225,3	189,3	219,9	220,3	216,4	217,2	209,9	213,8
	Exp	165,2	109,2	119,0	128,4	137,9	129,1	128,0	123,0
	$C_d$ teórico	0,701	0,703	0,702	0,702	0,702	0,702	0,704	0,702
	$C_{d\text{exp}}$	0,733	0,625	0,542	0,583	0,637	0,595	0,609	0,575
25 Hz	Teórica	295,1	241,6	287,9	287,4	285,4	284,0	272,7	278,1
	Exp	174,8	141,1	158,9	170,0	173,4	158,8	166,8	162,7
	$C_d$ teórico	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701	0,701
	$C_{d\text{exp}}$	0,592	0,625	0,552	0,592	0,559	0,559	0,612	0,585

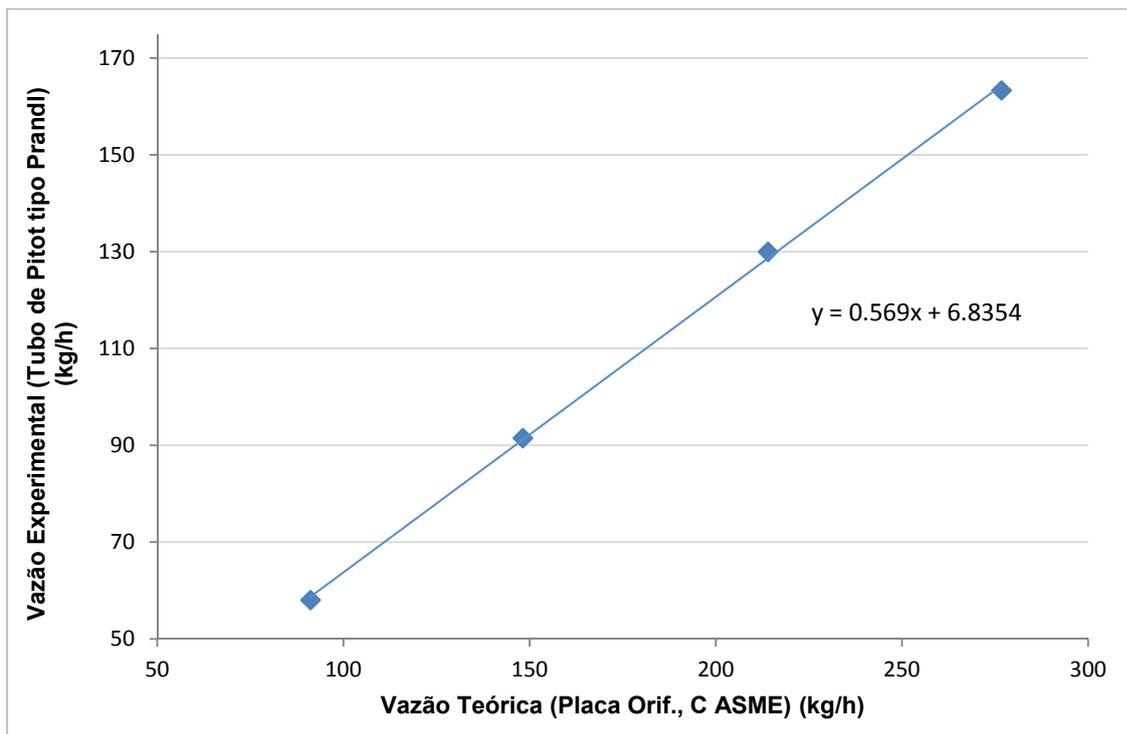
\* Os valores de vazão são valores mássicos dados em  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Os valores de vazão experimental para dos testes 1 e 5 apresentaram um certo desvio em relação aos demais testes, por este motivo optou-se por não considerá-los nos cálculos subsequentes. Calculando o valor médio da vazão experimental e vazão teórica, para cada frequência dentre os testes 2, 3, 4, 6, 7, 8, chega-se aos seguintes valores, apresentados na Tabela C.2.

**Tabela C. 2:** Média dos valores de vazão experimental e teórica, valores do coeficiente de descarga obtidos pela Equação (C.4) e números de Reynolds para o intervalo de trabalho.

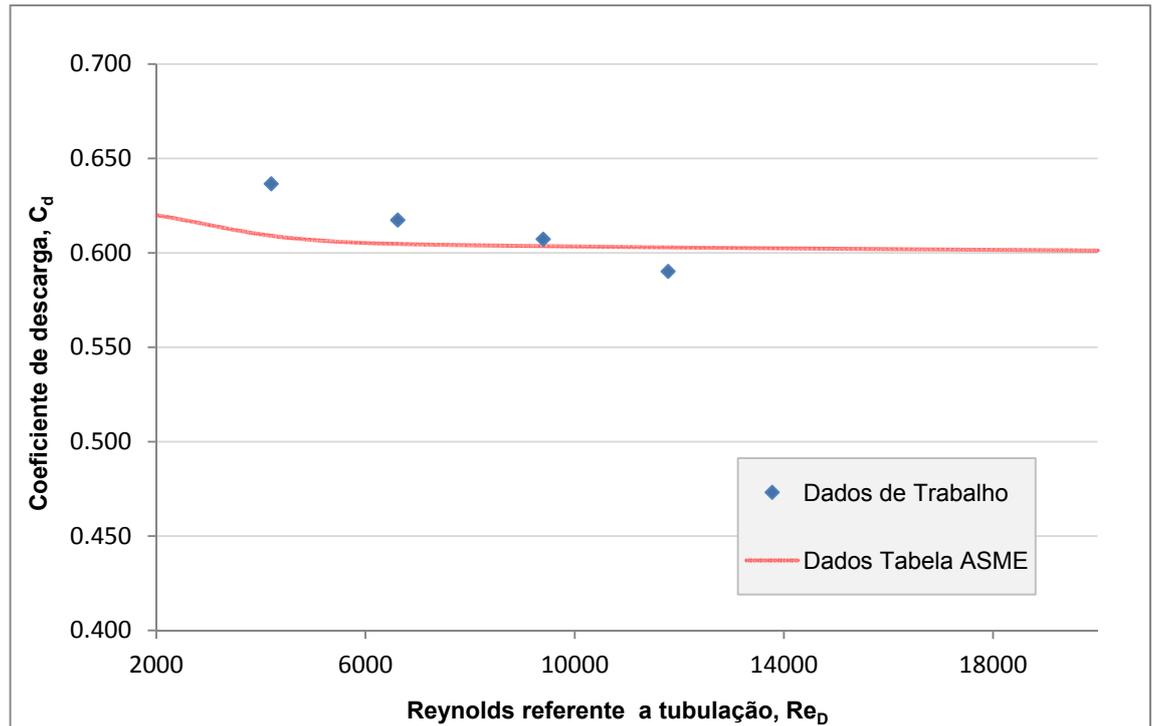
Frequências (Hz)	Vazão Exp. média (kg.s <sup>-1</sup> )	Vazão teórica média (kg.s <sup>-1</sup> )	C <sub>d</sub>	R <sub>D</sub>
10	54,6	91,0	0,600	3933,7
15	88,7	149,2	0,594	6360,1
20	122,8	213,9	0,574	8783,7
25	159,7	278,3	0,574	11523,8
			0,585	

A partir dos dados de vazão experimental e teórica da Tabela C.2, traçou-se o gráfico, mostrado na Figura C.1, onde o coeficiente angular da reta fornece o valor de  $C_d$  experimental.



**Figura C. 1:** Gráfico de Vazão Experimental (real) versus Vazão Teórica para obtenção de  $C_d$ .

Com os dados da Tabela C.2 é possível, também, traçar a curva de calibração generalizada para a placa de orifício estudada, através do gráfico de  $Re_d$  versus  $C_d$ , representado pela Figura C.2.



**Figura C. 2:** Gráfico da curva de calibração da placa de orifício e dados comparativos dos valores de  $C_d$  da Tabela ASME para uma placa com  $\beta_d = 0,26$ ;  $D = 275$  mm e tomadas de pressão de canto.

Analisando o comportamento da curva apresentada na Figura C.2, referente à calibração da placa de orifício, observa-se uma semelhança com a curva comparativa da Tabela ASME MFC-3M (2004).

Para o intervalo de vazões de interesse é importante salientar que os valores para os Coeficientes de Descarga se mantiveram dentro do intervalo considerado coerente para placas de orifício operantes nestas condições, ou seja, entre 0,6 e 0,7.

Com base no valor de  $C_d$  obtido experimentalmente e o valor obtido utilizando a média das vazões e a correlação dada pela Equação (C.4), chega-se a um valor único. Este valor foi então utilizado para corrigir os valores de vazão medidos pela placa, tanto neste trabalho, quanto para qualquer procedimento realizado no sistema do filtro.

Pelo coeficiente angular da reta mostrada na Figura C.1, o valor de  $C_d$ , é:

$$C_d = 0,569$$

Pela média dos valores de  $C_d$ , obtidos pela relação entre as vazões, apresentados na Tabela C.2, o valor de  $C_d$ , é:

$$C_d = 0,585$$

Da média dos dois valores, chega-se a um valor aproximado de:

$$C_d = 0,60$$

Este valor médio de  $C_d$ , juntamente com o valor médio do coeficiente de expansividade,  $Y$ , serão utilizados para corrigir os resultados de vazão da placa de orifício, conforme a Equação (C.5).

$$q_{real} = q_{placa} \times C_d \times Y$$

Sabendo que,

$$C_d = 0,6 \text{ e que o valor médio de } Y = 0,9997$$

tem-se, para cada valor de vazão medido pela placa, o valor real de vazão. Estes resultados estão dispostos na Tabela C.3.

**Tabela C. 3:** Valores e resultados das vazões para cada teste.

Freq	Testes * Vazões	1	2	3	4	5	6	7	8
		10 Hz	Experim (Pitot)	88,1	55,5	53,2	57,1	78,7	55,4
	Teórica (placa)	90,6	85,0	92,1	94,0	92,3	92,0	86,6	90,4
	Real (corrigida)	54,4	51,0	55,2	56,4	55,3	55,2	51,9	54,3
15 Hz	Experimental	124,4	83,5	76,9	105,8	108,3	92,1	86,4	87,3
	Teórica	152,5	133,5	151,6	154,4	152,4	150,8	143,6	150,9
	Real	91,5	80,1	90,9	92,6	91,4	90,4	86,1	90,5
20 Hz	Experimental	165,2	109,2	119,0	128,4	137,9	129,1	128,0	123,0
	Teórica	225,3	189,3	219,9	220,3	216,4	217,2	209,9	213,8
	Real	135,2	113,5	131,9	132,2	129,8	130,3	125,9	128,3
25 Hz	Experimental	174,8	141,1	158,9	170,0	173,4	158,8	166,8	162,7
	Teórica	295,1	241,6	287,9	287,4	285,4	284,0	272,7	278,1
	Real	177,0	144,9	172,7	172,4	171,2	170,4	163,5	166,8

\* Os valores de vazão são valores mássicos dados em  $\text{kg.s}^{-1}$ .

A partir dos valores apresentados na Tabela C.3, construiu-se a Tabela C. 4 usando as médias das vazões. Analisando os resultados obtidos nos testes 1 e 5, verificou-se que estes apresentavam um desvio significativo dos demais, por este motivo, optou-se por não considerá-los no cálculo da média das vazões. A Tabela C.4 apresenta os resultados finais.

Tabela C. 4: Valores médios das vazões.

Frequências	Vazão Teórica Placa ( $\text{kg.s}^{-1}$ )	Vazão Real Corrigida ( $\text{kg.s}^{-1}$ )	Vazão Experimental Pitot ( $\text{kg.s}^{-1}$ )
10 Hz	91,0	54,6	54,1
15 Hz	149,2	89,5	85,2
20 Hz	213,9	128,3	121,6
25 Hz	278,3	166,9	157,7

Para melhor visualização os valores de vazão experimental e frequências de trabalho foram plotados em um gráfico, conforme a Figura C.3.

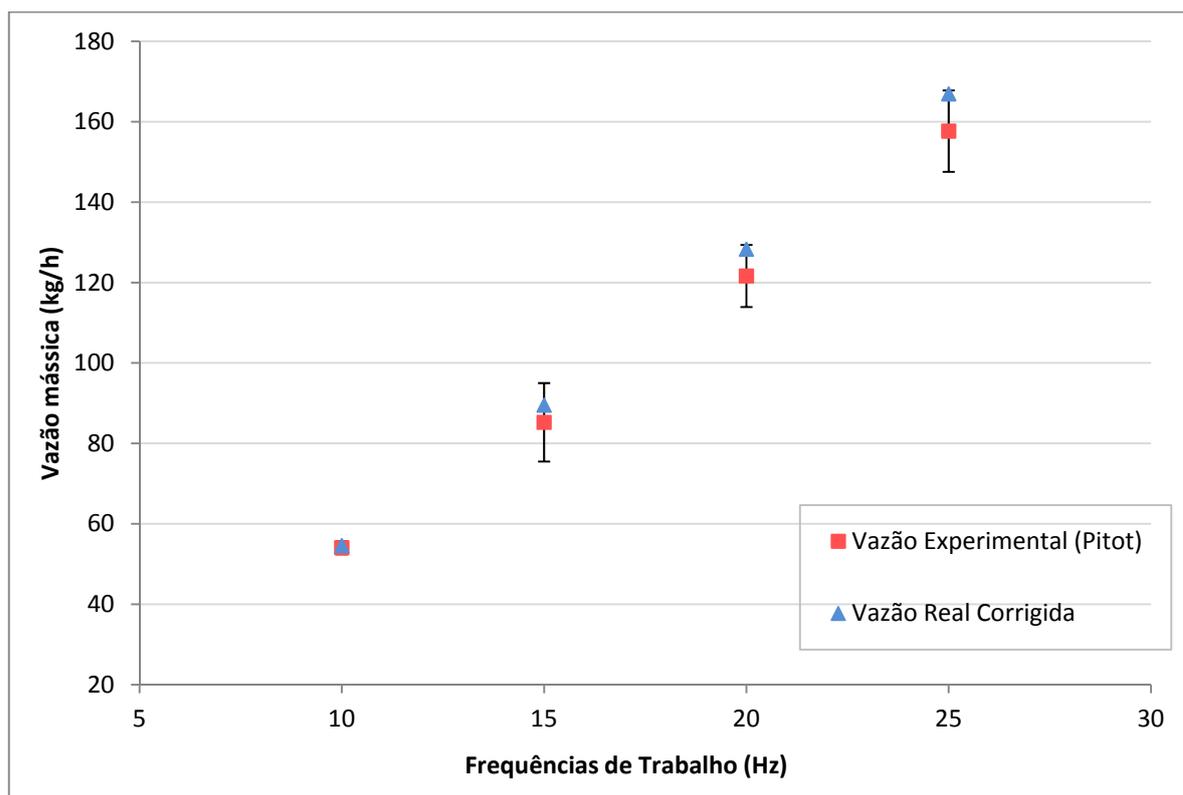


Figura C. 3: Representação dos resultados médios das vazões para cada frequência de trabalho.

O gráfico mostrado na Figura C.3 apresenta os resultados da vazão experimental e da vazão real da placa corrigida. É possível observar através do gráfico que os resultados estão coerentes, e dentro do desvio padrão calculado, o que comprova a boa atuação da placa para medição da velocidade do sistema.

# Apêndice D

A planilha utilizada durante os experimentos, com o objetivo de facilitar a coleta de dados, está apresentada na Figura D.1 a seguir.

**Figura D. 1:**Planilha para coleta de dados para os experimentos do filtro.

PLANILHA DE AMOSTRAGEM DE CAMPO								
Tarefa Calibração da placa e teste filtro			Local LETA			Data		
Amostrador Henrique, Letícia e Lucas			Duto 100 mm		Pressão Barométrica Pa		coef. Calibpitot	
			Temperatura °C		Umidade relativa %			
Frequência do ventilador								
Ponto	Dist. Ponto	$\Delta. P$ Pitot	Pressão estática	$\Delta.P$ placa	P estática placa	$\Delta.P$ filtro	P estática filtro	
	cm	mmH2O	mmH2O	Pa	Pa	Pa	Pa	
perfil vertical	1	0,44						
	2	1,46						
	3	2,96						
	4	7,04						
	5	8,54						
	6	9,56						
perfil horizontal	1	0,44						
	2	1,46						
	3	2,96						
	4	7,04						
	5	8,54						
	6	9,56						