



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Separação em Ciclones Filtrantes

João Carlos Gonçalves

Uberlândia
2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA

Uma Contribuição ao Estudo do Processo de separação em ciclones filtrantes

João Carlos Gonçalves

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, Área de Concentração e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G635c
2015 Gonçalves, João Carlos,
 Uma contribuição ao estudo do processo de separação em ciclones
 filtrantes [recurso eletrônico] / João Carlos Gonçalves. - 2015.

Orientador: João Jorge Ribeiro Damasceno.
Coorientador: Fábio de Oliveira Arouca.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.8024>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia Química. I. Damasceno, João Jorge Ribeiro, (Orient.).
II. Arouca, Fábio de Oliveira, (Coorient.). III. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV.
Título.

CDU: 66.0

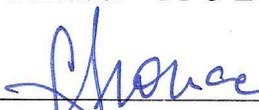
André Carlos Francisco
Bibliotecário - CRB-6/3408

Uma Contribuição ao Estudo do Processo de Separação em Ciclones Filtrantes

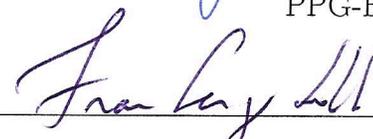
Tese de Doutorado apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Química em 28/08/2015.

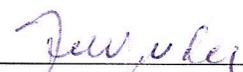
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Joao Jorge Ribeiro Damasceno
Orientador - PPG-EQ/UFU

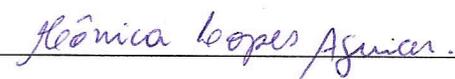

Prof. Dr. Fabio de Oliveira Arouca
Co-orientador - PPG-EQ/UFU


Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira.
PPG-EQ/UFU


Prof. Dr. Fran Sergio Lobato
PPG-EQ/UFU


Prof. Dr. Francisco José de Souza
PPG-EA/UFU


Prof. Dr. Edu Barbosa Arruda
UFTM


Profª. Drª. Mônica Lopes Aguiar
PPG-EQ/UFSCAR

Dedicatória

Aos meus pais *João Adalberto Gonçalves* e *Marlúcia dos Reis Gonçalves* que, com sabedoria divina, ensinaram-me os mais preciosos valores da vida.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado a vida e permitir que eu tenha ao meu lado pessoas tão especiais, às quais gostaria de tecer meus mais sinceros agradecimentos:

Gostaria de agradecer meus pais João Adalberto e Marlúcia que mesmo nos momentos mais difíceis, não deixaram de acreditar que só o conhecimento é capaz de libertar e mudar os rumos da vida.

Agradeço ao meu irmão Gelma e minhas irmãs Josimá e Josiane pelo companheirismo, amizade e palavras amigas nas horas mais difíceis.

Agradeço a minha amada esposa Marina pelo amor incondicional; sendo a melhor mãe, a melhor amiga e a melhor esposa. Só você sabe o quanto foi difícil chegar até aqui, Te Amo.

Agradeço aos meus filhos Valentina e Théo pelo amor e paciência ao abdicarem um pouco do tempo comigo em prol desse projeto.

Ao professor Damasceno, sou muito grato pela confiança depositada e pelos ensinamentos, sempre passados com humildade e sabedoria.

Ao professor Fábio Arouca pela orientação no trabalho e pela simplicidade com que me ensinou ver a vida.

Ao professor Luiz Gustavo pela amizade e ensinamentos que me foram e serão de muita valia.

Ao professor Luiz Guisso pela ajuda incondicional na montagem do Cluster e acima de tudo pela amizade do dia-a-dia.

Aos amigos Robson, Tiago Tahan, Camilo, Rosilany, Raissa e Gustavo.

Aos secretários Silvino e Maria Cecília pela ajuda, mesmo que à distância.

Por fim agradeço a todos aqueles que de certa forma colaboraram para o sucesso deste trabalho.

*“O verdadeiro conhecimento e sabedoria
sempre são acompanhados por humil-
dade”.*

(Gary Henry)

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
Simbologia	xix
Resumo	xxiii
Abstract	xxv
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	5
2 Revisão Bibliográfica	7
2.1 Ciclones	7
2.1.1 Princípios Básicos do Funcionamento em Ciclones	9
2.1.2 Tipos de Ciclones	9
2.1.3 Granulometria das Partículas	11
2.1.4 Ajustes a Modelos de Distribuição Granulométrica	12
2.1.5 Eficiência de Separação em Ciclone	14
2.2 Filtração	17
2.2.1 Equações do Escoamento de uma Única Fase em Meio Poroso	17

2.2.2	Fundamentos de Filtração	18
2.2.3	Variáveis importantes na Filtração em tecido	19
2.3	Escoamento no Interior de Ciclones	22
2.3.1	Componentes de Velocidades em Ciclone	25
2.3.2	Características Adicionais do Escoamento do Gás	27
2.3.3	Queda de Pressão	29
2.4	Fluidodinâmica Computacional (CFD)	32
2.4.1	Métodos de Discretização	33
2.4.2	Malhas Numéricas	35
2.4.3	Esquemas de Interpolação	37
2.4.4	Resolução de Sistemas de Equações Algébricas	41
2.4.5	Modelagem da Fase Gasosa	42
2.4.6	Modelagem da Turbulência	44
2.4.7	Metodologia CFD	54
2.4.8	Aplicação de CFD em Ciclones	59
2.4.9	CFD em Meios Porosos	65
3	Materiais e Métodos	69
3.1	Sistema Experimental	69
3.1.1	Controle de Vazão da Fase Gasosa	73
3.1.2	Controle de Alimentação de Particulados	74
3.1.3	Caracterização do Material Particulado	75
3.1.4	Determinação da Permeabilidade e do Coeficiente de Resistência Inercial do Meio Filtrante	79
3.1.5	Determinação das Medidas de Queda de Pressão nos Ciclones	84
3.1.6	Medidas de Eficiência Global de Coleta	84
3.2	Modelagem Computacional	85
3.2.1	Configurações dos Ciclones	85
3.2.2	Planejamento dos Experimentos Numéricos	86
3.2.3	Estrutura Computacional	89

3.2.4	Construção das Geometrias e Malhas	89
3.2.5	Condições de Contornos	90
3.2.6	Análise de Independência de Malhas	91
3.2.7	Configuração do <i>Solver</i>	92
4	Análise dos Resultados	95
4.1	Resultados Experimentais em Laboratório	95
4.1.1	Determinação da Permeabilidade em Ciclone Filtrante	95
4.1.2	Análise de Desempenho dos Ciclones Convencionais e Filtrantes	103
4.2	Resultados Numéricos Experimentais	109
4.2.1	Geração das Malhas de Ciclones	110
4.2.2	Experimentos de Verificação Numérica	111
4.2.3	Comportamento Fluidodinâmico em Ciclone Convencional	113
4.2.4	Comportamento Fluidodinâmico em Ciclone Filtrante	114
4.2.5	Análise das Variáveis em Ciclones Filtrantes	115
4.2.6	Efeito da Permeabilidade sobre o Escoamento do Ciclone Filtrante	123
4.2.7	Efeito da Vazão de Alimentação sobre o Escoamento do Ciclone Filtrante	127
4.2.8	Efeito da Altura da Alimentação sobre o Escoamento do Ciclone Filtrante	129
5	Conclusões e Sugestões	133
5.1	Conclusões	133
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	134
	Referências Bibliográficas	141
	Anexo A	143
	A primeira proposta de patente para um ciclone	143
	Apêndice A	145
	Equações para determinação das permeabilidades: Metodologia 01	145

Apêndice B	149
Equações para determinação das permeabilidades: Metodologia 02	149
Apêndice C	155
Equações para determinação das permeabilidades: Metodologia 03	155
Apêndice D	159
Resultados de experimentais para determinação da permeabilidade	159
Apêndice E	163
Contornos dos Perfis de Pressão para o Ciclone Filtrante	163
Apêndice F	173
Perfis de velocidades axiais em ciclone Filtrante	173

LISTA DE FIGURAS

1.1	Fluidodinâmica em Ciclone Convencional (ELSAIED; LACOR, 2011a)	2
1.2	Ciclone Filtrante	4
2.1	Curva de eficiência típica no ciclone (HOFFMANN; STEIN, 2007)	16
2.2	Filtrações plana e radial (MASSARANI, 1985)	23
2.3	Comportamento no interior de ciclone(ELSAIED; LACOR, 2011a)	24
2.4	Esboço do perfil de velocidade tangencial na região de separação em um ciclone (HOFFMANN; STEIN, 2007)	26
2.5	Os escoamentos secundários causados pela turbulência no ciclone (HOFFMANN; STEIN, 2007)	29
2.6	Perfis radiais de (a) Velocidade Tangencial, (b) Velocidade Axial, (c) Velocidade Radial e (d) Pressão (LEITH et al., 1984)	30
2.7	Esquema de uma malha bidimensional estruturada	36
2.8	Esquema de uma malha bidimensional Não Estruturada	37
2.9	Esquema de interpolação: primeira ordem <i>upwind</i>	38
2.10	Esquema de interpolação: diferenças centrais	39
2.11	Esquema de interpolação de <i>Power Law</i>	40
2.12	Esquema de interpolação: segunda ordem <i>upwind</i>	41
2.13	Esquema de interpolação: <i>Quadratic Upstream Interpolation Convective Kinetics (QUICK)</i>	41
2.14	A decomposição do espectro de energia (SHALABY, 2007)	52

2.15	Cascata de energia (SHALABY, 2007)	53
2.16	Interligação dos três elementos Principais em CFD (TU et al., 2007)	55
2.17	Procedimento de cálculo Segregado (FLUENT, 2011)	57
2.18	Procedimento de cálculo acoplado (FLUENT, 2011)	58
2.19	Procedimento de cálculo: método transiente(FLUENT, 2011)	59
3.1	Esquema geral da unidade experimental de transporte pneumático	70
3.2	Esquema geral da unidade experimental para o ciclone convencional	71
3.3	Esquema geral da unidade experimental para o ciclone filtrante	72
3.4	Dimensões básicas dos ciclones	74
3.5	Curva e calibração do venturi	75
3.6	Sistema de alimentação de particulados	76
3.7	Curva de calibração para alimentação de Magnesita	76
3.8	Análise granulométrica da magnesita	78
3.9	Esquema geral da unidade experimental de filtração na câmara de filtração	81
3.10	Esquema de filtração para a metodologia 02	82
3.11	Representação dos manômetros utilizados para medir as quedas de pressão	83
3.12	Cluster	89
3.13	Sistema de geração de malhas para ciclones filtrantes	90
4.1	Análise da permeabilidade conforme Metodologia 01: equação de Darcy	96
4.2	Análise da permeabilidade conforme Metodologia 01: equação de <i>Forchheimer</i>	97
4.3	Análise da permeabilidade conforme Metodologia 02: equação de Darcy	99
4.4	Análise da permeabilidade conforme Metodologia 02: equação de <i>Forchheimer</i>	100
4.5	Análise da permeabilidade conforme Metodologia 03	101
4.6	Eficiência global de coleta em ciclone Convencional	104
4.7	Eficiência global de coleta em ciclone Filtrante	105
4.8	Eficiência global de coleta em ciclones convencional e Filtrante	106
4.9	Queda de pressão em ciclone Convencional com e sem injeção de partículas	107

4.10	Queda de pressão em ciclone Filtrante	108
4.11	Queda de pressão em ciclones convencional e Filtrante	109
4.12	Malhas em Ciclone Convencional	111
4.13	Malhas em Ciclone Filtrante	112
4.14	Verificação numérica dos resultados experimentais	112
4.15	Gráficos de contornos para o ciclone convencional	113
4.16	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante	114
4.17	Diagrama de Pareto para a variável E_u	116
4.18	Superfície de resposta para E_u em função de X_1 e X_2 com $X_3 = 0$	118
4.19	Superfície de resposta para E_u em função de X_1 e X_3 com $X_2 = 0$	118
4.20	Superfície de resposta para E_u em função de X_2 e X_3 com $X_1 = 0$	119
4.21	Diagrama de Pareto para a variável R_f	121
4.22	Superfície de resposta para R_f em função de X_1 e X_2 com $X_3 = 0$	122
4.23	Superfície de resposta para R_f em função de X_1 e X_3 com $X_2 = 0$	122
4.24	Superfície de resposta para R_f em função de X_2 e X_3 com $X_1 = 0$	123
4.25	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,057 \text{ m}$	124
4.26	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,057 \text{ m}$	125
4.27	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,133 \text{ m}$	125
4.28	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,133 \text{ m}$	126
4.29	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} \text{ m}^2/s$ e $a = 0,057 \text{ m}$	127
4.30	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} \text{ m}^2/s$ e $a = 0,057 \text{ m}$	128
4.31	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} \text{ m}^2/s$ e $a = 0,133 \text{ m}$	128
4.32	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} \text{ m}^2/s$ e $a = 0,133 \text{ m}$	129

4.33	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,04 m^3/s$	130
4.34	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,04 m^3/s$	130
4.35	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,08 m^3/s$	131
4.36	Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,08 m^3/s$	131
1	Primeira patente sobre ciclones (HOFFMANN; STEIN, 2007)	144
B.1	Tronco de Cone em coordenadas cilíndricas	150
C.1	Tronco de Cone em coordenadas esféricas	156
E.1	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 01	164
E.2	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 02	164
E.3	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 03	165
E.4	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 04	165
E.5	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 05	166
E.6	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 06	166
E.7	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 07	167
E.8	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 08	167
E.9	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 09	168
E.10	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 10	168
E.11	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 11	169
E.12	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 12	169
E.13	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 13	170
E.14	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 14	170
E.15	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 15	171
E.16	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 16	171
E.17	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 17	172
E.18	Gráficos de contornos para o ciclone Filtrante no Experimento 18	172

F.1	Perfis radiais de velocidade axial plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,057$ m	174
F.2	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,057$ m	174
F.3	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,133$ m	175
F.4	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,133$ m	175
F.5	Perfis radiais de velocidade axial plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,057$ m	176
F.6	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,057$ m	176
F.7	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,133$ m	177
F.8	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,133$ m	177
F.9	Perfis radiais de velocidade axial plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$	178
F.10	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$	178
F.11	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$	179
F.12	Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$	179

LISTA DE TABELAS

3.1	Parâmetros do ajuste RRB	79
3.2	Dimensões dos ciclones	85
3.3	Matriz do Planejamento Experimental (PCC)	87
3.4	Condições de contorno nos ciclones Convencionais	91
3.5	Condições de contorno nos ciclones filtrantes	91
3.6	Teste de independência de malhas	91
4.1	Valores de permeabilidade K, conforme equação de <i>Forchheimer</i>	102
4.2	Valores do Coeficiente inercial C_2 , conforme equação de <i>Forchheimer</i>	102
4.3	Matriz do Planejamento Experimental (PCC)	110
4.4	Análise de variância (ANOVA) e Coeficientes de regressão para Eu	116
4.5	Análise de variância (ANOVA) e Coeficientes de regressão para R_f	120
D.1	Resultados de permeabilidade: Metodologia 01	160
D.2	Resultados de permeabilidade: Metodologia 02	161
D.3	Resultados de permeabilidade: Metodologia 03	162

SIMBOLOGIA

Os principais símbolos utilizados neste trabalho foram:

a	-termo quadrático do ajuste à equação de <i>Forchheimer</i>	$M^1L^{-4}T^0$
a	-altura da entrada de alimentação	$M^0L^1T^0$
A	-área de do filtro	$M^0L^2T^0$
B_c	-diâmetro do <i>underflow</i>	$M^0L^1T^0$
b	-termo linear do ajuste à equação de Darcy	$M^1L^{-3}T^{-2}$
b	-largura de entrada da alimentação	$M^0L^1T^0$
b	-vetor intensidade de campo	$M^0L^0T^0$
β	-parâmetro da equação 2.15	$M^0L^{-1}T^0$
β	-número de Euler segundo Massarani (1997) na equação 2.25	$M^0L^0T^0$
c	-parâmetro da equação 2.16	$M^0L^0T^0$
C	-parâmetro da equação 2.22	$M^0L^2T^1$
C_2	-parâmetro da Equação 2.18	$M^0L^{-1}T^0$
δ	-parâmetro do modelo 2.2	$M^0L^0T^0$
D	-diâmetro característico da partícula	$M^0L^1T^0$
D	-diâmetro do cilindro do ciclone	$M^0L^1T^0$
D^*	-diâmetro de Corte	$M^0L^1T^0$
d'	-parâmetro do modelo RRB	$M^0L^1T^0$
d_{50}	-diâmetro de corte de 50%	$M^0L^1T^0$
$d_{63,2}$	-diâmetro de corte de 63,2%	$M^0L^1T^0$
D_x	-diâmetro do <i>vortex finder</i>	$M^0L^1T^0$
S	-comprimento do <i>vortex finder</i>	$M^0L^1T^0$
e	-vetor normal à superfície singular	$M^0L^0T^0$
ϵ	-dissipação da energia cinética turbulenta	$M^0L^0T^0$
ϵ	-porosidade do meio	$M^0L^0T^0$
ϕ	-propriedade de transporte	$M^0L^0T^0$
ϕ_E	-propriedade de transporte no nó E	$M^0L^0T^0$
ϕ_e	-propriedade de transporte na face	$M^0L^0T^0$
ϕ_P	-propriedade de transporte no nó P	$M^0L^0T^0$

(*Continua na próxima página*)

ϕ_P	-fração de volumétrica de sólidos	$M^0L^0T^0$
ϕ_W	-propriedade de transporte no nó W	$M^0L^0T^0$
F_c	-força centrífuga na equação 2.19	$M^1L^1T^{-2}$
F_d	-força de força de arraste na equação 2.20	$M^1L^1T^{-2}$
h	-altura da seção cilíndrica	$M^0L^1T^0$
h_c	-altura da seção cônica	$M^0L^1T^0$
H_t	-altura total do ciclone	$M^0L^1T^0$
k	-energia cinética turbulenta	$M^0L^0T^0$
K	-parâmetro da equação 2.1	$M^0L^1T^0$
K	-permeabilidade do meio poroso	$M^0L^2T^0$
L	-Espessura do meio filtrante	$M^0L^1T^0$
m	-parâmetro da equação 2.1	$M^0L^0T^0$
m_d	-força resistiva exercida pelo fluido sobre o meio poroso	$M^1L^1T^{-2}$
m	-massa	$M^1L^0T^0$
$\bar{\eta}$	-eficiência global de coleta	$M^0L^0T^0$
η	-eficiência individual de coleta	$M^0L^0T^0$
n	-parâmetro do modelo RRB	$M^0L^0T^0$
Re_p	-número de Reynolds da partícula	$M^0L^0T^0$
P_e	-pressão exercida nos poros sobre o fluido	$M^1L^{-1}T^{-2}$
ΔP_T	-queda de pressão total no filtro na equação 2.17	$M^1L^{-1}T^{-2}$
Δp	-queda de pressão no ciclone na equação 2.23	$M^1L^{-1}T^{-2}$
ΔP_m	-soma da queda de pressão no meio filtrante na equação 2.17	$M^1L^{-1}T^{-2}$
ΔP_C	-queda de pressão na torta de filtração na equação 2.17	$M^1L^{-1}T^{-2}$
p_2	-pressão no topo do tronco de cone (ponto 2)	$M^1L^{-1}T^{-2}$
p_1	-pressão no vértice do tronco de cone (ponto 1)	$M^1L^{-1}T^{-2}$
P_e	-número de Peclet	$M^0L^0T^0$
q	-velocidade superficial do fluido	$M^0L^1T^{-1}$
Q	-vazão volumétrica do fluido	$M^0L^3T^{-1}$
\mathbf{r}	-vetor posição	$M^0L^1T^0$
r	-comprimento da geratriz no tronco de cone	$M^0L^1T^0$
R_2	-comprimento da geratriz no tronco de cone no ponto 2	$M^0L^1T^0$
R_1	-comprimento da geratriz no tronco de cone no ponto 1	$M^0L^1T^0$
R_f	-razão de filtrado	$M^0L^0T^0$
r	-distância da partícula ao eixo do ciclone na equação 2.19	$M^0L^1T^0$
t	-tempo	$M^0L^0T^1$
\bar{u}_i	-componente i médio da velocidade do fluido	$M^0L^1T^{-1}$
u_i	-componente i da velocidade do fluido	$M^0L^1T^{-1}$
u_c	-velocidade média no interior do ciclone	$M^0L^1T^{-1}$
v_t	-velocidade tangencial	$M^0L^1T^{-1}$
v_r	-velocidade radial	$M^0L^1T^{-1}$
v_f	-velocidade intersticial do fluido	$M^0L^1T^{-1}$
ϕ_P	-Propriedade de transporte no nó P	$M^0L^0T^0$
Ω	-velocidade angular na equação 2.21	$M^0L^0T^{-1}$
θ	-ângulo do tronco de cone do ciclone	$M^0L^0T^{-1}$
X	-fração mássica das partículas	$M^0L^0T^0$
x_i	-ponto no espaço	$M^0L^1T^0$

(*Continua na próxima página*)

Y	-fração em volume de partículas	$M^0L^0T^0$
$\bar{\rho}_i$	-concentração mássica do constituinte i	$M^1L^{-3}T^0$
$\Delta\rho$	-variação das massas específicas dos constituintes	$M^1L^{-3}T^0$
μ	-viscosidade do gás	$M^1L^{-1}T^{-1}$
ρ	-massa específica do gás	$M^1L^{-3}T^0$
ρ_p	-massa específica do sólido	$M^1L^{-3}T^0$
$\overline{u'_i u'_j}$	-tensor de viscoso de <i>Reynolds</i>	$M^0L^0T^1$
τ_{ij}	-tensor de viscoso de <i>Reynolds</i>	$M^0L^0T^1$
τ_e	-tempo correspondente ao vórtice de maior escala	$M^0L^0T^1$
τ_p	-tempo de residência da partícula	$M^0L^0T^1$
ζ_c	-parâmetro na equação 2.23	$M^0L^0T^1$

RESUMO

O processo de separação em ciclones filtrantes é análogo ao comportamento fenomenológico em ciclone convencional, entretanto, a presença do meio filtrante proporciona perturbações significativas no escoamento. Analisando o processo de separação em ciclones filtrantes, verificou-se que a permeabilidade interfere no comportamento fluidodinâmico e devido algumas inconsistências na forma de determinação até então, fez parte dos objetivos desta tese a proposição de metodologias alternativas para se determinar a permeabilidade do meio filtrante. O presente trabalho fundamentou-se no estudo, análise e compreensão do comportamento fluidodinâmico em ciclones filtrantes. Na investigação, foram utilizadas técnicas experimentais e conhecimentos de fluidodinâmica computacional (CFD), para o melhor entendimento do complexo processo de separação em ciclones filtrantes. A principal contribuição do estudo foi avaliar o comprimento da altura da alimentação, a permeabilidade no cone e a vazão volumétrica de alimentação, a fim de estudar o comportamento fluidodinâmico no interior do equipamento. Como resultados experimentais de laboratório, verificou-se que a permeabilidade é influenciada pela forma geométrica da área, de modo que a metodologia proposta na tese foi a mais adequada, por levar em consideração os efeitos geométricos da área e preservar as características reais do escoamento. Ainda em relação aos resultados de laboratório, verificou-se que em elevadas velocidades de alimentação a diferença na eficiência de separação entre os ciclones convencional e filtrante ficou em torno de 5%. Também foi avaliado o efeito da injeção de partículas sobre a queda de pressão em ciclones filtrante e convencional; nestes casos; neste caso, ambos proporcionaram a diminuição da queda de pressão ao se injetar particulado. Em relação aos resultados numéricos, foram analisados estatisticamente a significância das variáveis independentes em relação ao número de Euler (E_u) e a razão de filtrado (R_f). Verificou-se que as três variáveis analisadas foram significativas no processo em relação às variáveis resposta. Os resultados das simulações numéricas mostraram que altura da alimentação foi a variável que mais interferiu no desempenho do ciclone filtrante (E_u); em relação a R_f a variável determinante foi a permeabilidade. Em se tratando do comportamento fenomenológico, a permeabilidade apresentou efeito significativo sobre o perfil de velocidades tangencial para baixas vazões contendo o ciclone uma pequena altura da alimentação.

Palavras chave: Separação sólido-Gás, ciclone, filtração, fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

The process of separation in filtering cyclone is analogous to the phenomenological behavior in the conventional cyclone, however, the presence of the filter medium provides significant flow disturbances. Analyzing the process of separation in filtering cyclone, it was found that permeability interferes on the fluid dynamic behavior and because some inconsistencies in the form of determination until then, was part of the objectives of this thesis the proposition of alternative methodologies to determine the permeability of the filter medium. This work was based on the study, analysis and understanding of the fluid dynamic behavior in filtering cyclones. In research, we used experimental techniques and knowledge of computational fluid dynamics, for the better understanding of the complex process of separation in filtering cyclones. The main contribution of this study was to evaluate the length of the height of the feed, the permeability in the cone and the volumetric flow rate of feed, in order to study the fluid dynamic behavior inside the equipment. As laboratory experimental results, it was found that permeability is influenced by the geometric shape of the area, so that the methodology proposed in the thesis was the most appropriate, taking into account the geometric effects and preserve the real features of the flow. With regard to the lab results, it was found that at high feed speeds the difference in separation efficiency of conventional and filtering cyclones was around 5 %. It was also evaluated the effect of injection of particles on pressure drop in filtering and conventional cyclones; in this case, both provided the decrease of pressure drop when you inject particulates. In relation to the numerical results were statistically analyzed the significance of independent variables in relation to the Euler number (E_u) and the reason of the filtrate (R_f). It was found that the three analyzed variables were significant in the process in relation to the response variables. The results of numerical simulations have shown that the feed height was the variable that most interfered in the cyclone filter performance (E_u); about R_f the variable determinant was the permeability. In the case of the phenomenological behavior, the permeability presented significant effect on the tangential speeds profile for low flows rate containing a small cyclone feed height.

Key words: solid-gas separation, cyclone, filtration, computational fluid dynamics.

CAPÍTULO 1

Introdução

 CICLONE é um equipamento de separação sólido fluido muito utilizado em diversos processos industriais. Fatores como a simplicidade na construção, estrutura compacta, ausência de partes móveis e principalmente o baixo custo de operação fazem com que o ciclone seja um equipamento amplamente utilizado na separação de gases e particulados (BOYSAN et al., 1982).

Hoffmann e Stein (2007) abordam, algumas vantagens do ciclone frente outros equipamentos de separação, o que torna o ciclone tão versátil:

- o produto recolhido ao final do processo de separação permanece seco;
- os custos de investimento e de manutenção são baixos na maioria das aplicações;
- é um equipamento muito compacto na maioria das aplicações;
- pode ser usado sob condições de operação extremas, principalmente em altas pressões e temperaturas com alimentação de produtos quimicamente agressivos;
- não apresenta partes móveis, minimizando problemas de manutenção;
- pode ser construído a partir de materiais diversos, de acordo com a necessidade do serviço, incluindo a placa de aço, metais fundidos, ligas, alumínio, plásticos, cerâmicas, entre outros;

- pode ser revestido internamente com material resistente à erosão ou resistente à corrosão. As superfícies internas podem ainda ser electro polidas a fim de minimizar problemas de incrustação;
- pode separar sólidos ou partículas líquidas.

Um ciclone convencional apresenta um corpo cilíndrico com uma seção cônica conectada na parte inferior, um duto de alimentação retangular tangencial conectado na parte cilíndrica, próximo ao topo, e dois dutos de saída: um comumente denominado de *underflow*, localizado no fundo da seção cônica, e o outro localizado no topo da seção cilíndrica, comumente denominado de *overflow*, conforme representação da Figura 1.1.

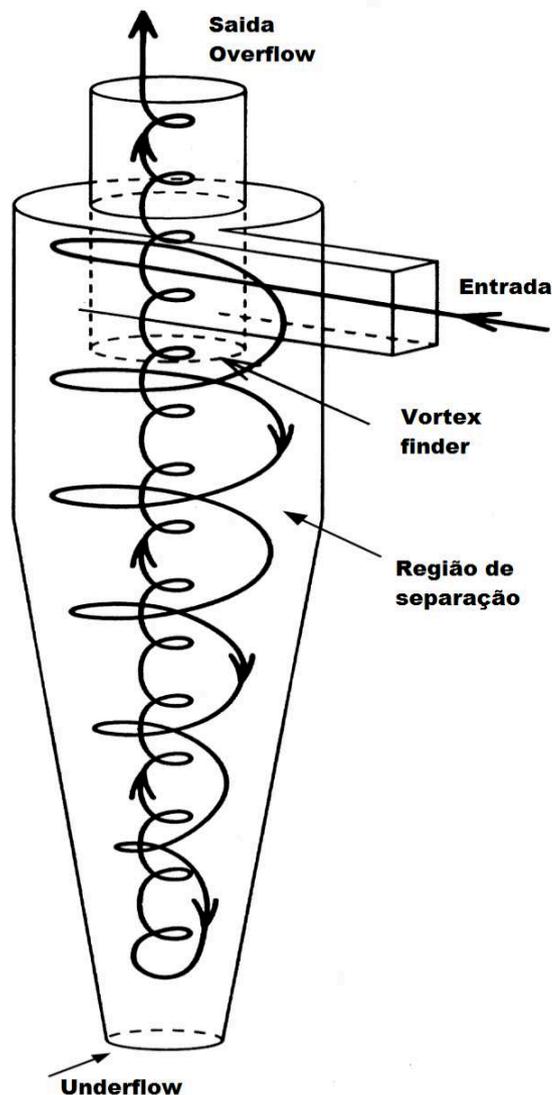


Figura 1.1: Fluidodinâmica em Ciclone Convencional (ELSAYED; LACOR, 2011a).

Ogawa (1997), com muita propriedade, descreve as características fenomenológicas do escoamento em ciclone convencional. Segundo o autor a suspensão gás-sólido é alimentada

tangencialmente no ciclone, o que provoca um movimento giratório que leva a formação de um vórtice na seção anular entre o duto de saída (*vortex finder*) e o corpo cilíndrico do ciclone, originando assim um escoamento descendente em seu interior. Devido à ação de forças centrífugas, partículas maiores são carreadas em direção à parede interna do corpo cilíndrico do ciclone, levando a formação de um vórtice externo. O gás, por sua vez, devido o movimento descendente e o choque com as paredes do ciclone, propicia um escoamento giratório em alta velocidade, promovendo um significativo incremento na intensidade de turbulência. Este aumento na turbulência é a força motriz necessária para promover uma dispersão da quantidade de movimento associada a restrição de área, devido à seção cônica do equipamento, que provoca uma aceleração no fluido dada à existência de uma zona de baixa pressão ao longo do eixo central do ciclone; ocasionando a reversão do escoamento e, conseqüentemente, a formação de um novo vórtice interno, ascendente contendo gás mais limpo. Dada a complexidade do escoamento, a formação do duplo vórtice em ciclones é uma das motivações para exaustivos estudos dos fenômenos de turbulência em tais equipamentos (DIAS, 2009).

O ciclone filtrante é um equipamento de separação gás-sólido, dotado de uma parede cônica filtrante, de modo que durante o funcionamento no processo de separação no equipamento, além das correntes de: alimentação, *underflow* e *overflow*, há ainda uma corrente de saída adicional de gás, proveniente do processo de filtração que ocorre na região cônica (DAMASCENO; BARROZO, 2008). O esquema de separação em ciclones filtrante é apresentado na Figura 1.2.

O ciclone filtrante é um equipamento de separação sólido gás, não convencional, que possibilita a separação gás-sólido em altas vazões de alimentação. Para particulados com distribuição de tamanhos elevados, o ciclone filtrante é um equipamento bastante útil, uma vez que proporciona um baixo custo energético, com uma eficiência de coleta similar a de um ciclone convencional.

O ciclone filtrante foi objeto de pedido de patente do Departamento de Engenharia Química da UFU (atualmente Faculdade de Engenharia Química) proposta por Damasceno e Barrozo (2008). Este equipamento teve como pontos de partida vários estudos realizados na FEQUI/UFU: Rodrigues (2001), Andrade et al. (2002) e Lacerda (2007).

Mesmo com os estudos anteriormente citados, pouco se encontram na literatura, trabalhos que abordem especificamente ciclones filtrantes. A motivação para este trabalho é compreender o comportamento de separação em um equipamento de separação gás-sólido, não convencional, que possibilita a utilização de uma maior vazão de operação a um custo energético reduzido.

O presente trabalho fundamenta-se no estudo, análise e compreensão do comporta-

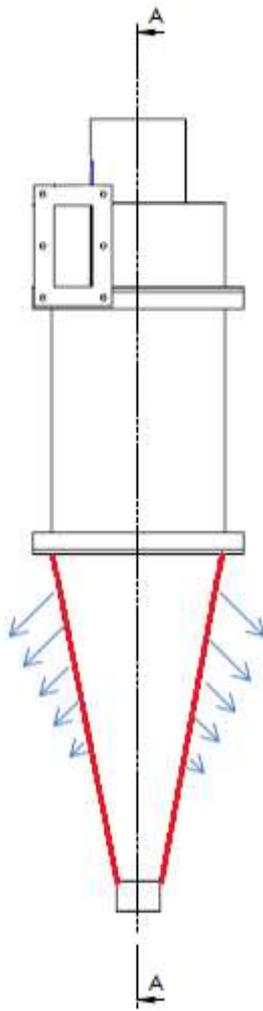


Figura 1.2: Ciclone Filtrante.

mento fluidodinâmico em ciclones filtrantes. Na investigação, serão utilizadas técnicas e conhecimentos de fluidodinâmica computacional (CFD), para o melhor entendimento do complexo processo de separação em ciclones filtrantes. A principal contribuição do estudo é avaliar algumas variáveis geométricas, estruturais e operacionais: dimensão da altura da alimentação, permeabilidade no cone e vazão volumétrica de alimentação respectivamente, visando sempre, um melhor entendimento do comportamento fluidodinâmico no interior do equipamento. A conclusão do trabalho perpassa pela verificação numérica da modelagem por meio de experimentos realizados na unidade experimental. Após a verificação, serão feitas análises, a fim de averiguar os efeitos das variáveis apresentadas e sugerir a melhor configuração para o ciclone filtrante.

1.1 Objetivos

Diante do que foi exposto, o presente estudo dos processos de separação em ciclones filtrantes teve como principais objetivos:

1. dar continuidade aos resultados obtidos previamente com o estudo de ciclones filtrantes (LACERDA, 2007);
2. construir uma unidade piloto para que os ciclones filtrantes fossem devidamente instalados, a fim de que pudessem ser reproduzidas condições operacionais nas dependências do laboratório de operações unitárias do Instituto Federal do Norte de Minas (IFNMG) no campus Montes Claros;
3. propor uma metodologia experimental que viabilize a determinação da permeabilidade em ciclones filtrantes;
4. avaliar, via experimentos de simulação, os efeitos da dimensão altura da alimentação, da vazão volumétrica de alimentação e da permeabilidade do meio filtrante, sobre o número de Euler e sobre a razão de filtrado em ciclones filtrantes;
5. discutir numericamente as diferenças entre o comportamento fluidodinâmico em ciclones convencional e filtrante, via simulação 3D em CFD.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica



ESTE CAPÍTULO são apresentadas as publicações mais representativas em relação aos estudos com ciclones convencionais e filtrantes, ao longo dos anos, apontando evoluções e contrapontos.

2.1 Ciclones

A primeira proposta de patente para um ciclone foi submetida por John M. Finch, nos Estados Unidos, no ano de 1885, ao qual denominou o equipamento criado de *Dust Collector*, conforme Figura 1 em anexo. Posteriormente, somente por volta de 1920, tornou-se comum o uso de ciclones similares aos encontrados atualmente. Com o passar dos anos, mesmo mantendo os princípios básicos de funcionamento dos ciclones, houve durante esse tempo uma intensa evolução quanto à pesquisa e utilização desde equipamento em aplicações industriais, de modo que avanços no projeto desses equipamentos fossem obtidos (HOFFMANN; STEIN, 2007).

Ciclones são equipamentos industriais muito utilizados na separação de partículas, pois contemplam estrutura robusta e construção muito simples. Na separação gás-sólido, o ciclone deve ser a primeira opção a ser testada, uma vez que apresenta baixos custos de investimento e de operação, aliados à alta confiabilidade; o que torna este equipamento uma das prioridades na hierarquia de tecnologias a serem adotadas. Ciclones têm sido utilizados, com sucesso, em diversas aplicações industriais, das mais simples às mais

complexas: como condições altamente erosivas, aplicações em altas temperaturas de funcionamento, podendo exceder até 1000°C e em aplicações em altas pressões, podendo ser superiores a 100 bar (HOFFMANN; STEIN, 2007).

Entretanto, como qualquer equipamento, cabe ressaltar que o ciclone também apresenta algumas desvantagens:

- baixa eficiência para tamanhos de partículas menores que o diâmetro de corte, sob condições de baixa alimentação de sólidos.
- elevadas quedas de pressão quando comparado a outros equipamentos de separação, incluindo filtros de mangas e lavadores de baixa queda de pressão.
- sujeito a desgaste erosivo e incrustações quando se processa abrasivos.
- pode operar abaixo das expectativas, se não projetados e operados corretamente. Embora estes problemas, bem como a erosão e a incrustação mencionados acima, não são exclusivos para os ciclones.

Apesar dos princípios que regem o comportamento fluidodinâmico em ciclones não terem mudado desde sua invenção ao final de 1800, ao longo dos anos, muitos testes e aplicações industriais tem viabilizados significativos avanços em projetos. Alguns autores realizaram estudos interessantes sobre o projeto de ciclones: as proporções relativas de geometria e da entrada foram avaliada por Elsayed e Lacor (2011a), as dimensões no *vortex finder* e seus efeitos foram analisados por Raoufi et al. (2008), Kepa (2010) e Elsayed e Lacor (2013), os efeitos da forma do cilindro do ciclone foi analisado por Lee et al. (2006), o cone e suas formas foram estudadas por Yoshida (2013), o coletor e suas dimensões foi estudo por Park et al. (2012). Esses são somente alguns, dos muitos trabalhos existentes na literatura, que propuseram modificações nas configurações geométricas visando um melhor desempenho.

Os ciclones são equipamentos de separação que se enquadram entre os separadores centrífugos. É um equipamento desprovido de partes móveis, que apresenta como motriz, a força centrífuga para separar partículas sólidas existentes no fluxo gasoso. O fluido, juntamente com partículas, são alimentados tangencialmente e perto do topo de modo que dê origem a uma espiral axial e descendente de gás. A presença do campo de forças centrífugas faz com que as partículas de entrada possam se deslocar até as paredes, onde se concentram, deslocando em espiral para baixo no interior do ciclone. As partículas retidas são coletadas no *underflow*.

2.1.1 Princípios Básicos do Funcionamento em Ciclones

Entre os diversos tipos de ciclones existentes, o modelo mais utilizado na indústria é o de fluxo inverso com alimentação tangencial, denominado nesta tese por ciclones. Neste equipamento o fluido entra tangencialmente na seção retangular localizada no topo da câmara cilíndrica, com uma componente de rotação bem elevada. O fluido escoo de forma descendente e rotativa próximo da parede até um determinado local, final do vórtice, onde a componente axial de velocidade será invertido, fazendo com que o fluido passe a subir axialmente. A ascensão do gás se desenvolve nas proximidades do eixo central do ciclone, de modo que, com a permanência do escoamento, um vórtice duplo é formado, como apresentado na Figura 1.1. O vórtice interno propulsiona o fluxo de gás, fazendo com que este saia pelo duto central denominado *vortex finder*. A propulsão interna do gás no corpo do ciclone leva à estabilidade dos vórtices interno e externo uma vez que minimiza os efeitos da alimentação sobre o vórtice. Cabe ressaltar, que a inversão peculiar a este tipo de escoamento em ciclones é aparentemente originada e influenciada pelo campo de pressão dentro do ciclone, e não direta e unicamente pela forma cônica ou dimensões geométricas (CORTES; GIL, 2007).

2.1.2 Tipos de Ciclones

Os ciclones são apresentados sob diversos tipos, obedecendo a um padrão básico, diferindo quanto à forma de alimentação de partículas, seja com entrada tangencial ou axial. Os ciclones são agrupados em *famílias*, em que cada uma possui como características básicas as relações constantes entre suas medidas geométricas com o diâmetro da parte cilíndrica (D). As principais famílias de ciclones, que já foram bem estudadas são: ciclone tipo Lapple, ciclone tipo Stairmand e o ciclone tipo Niigas. Detalhes sobre cada família de ciclones podem ser encontradas em Massarani (1997) e Hoffmann e Stein (2007).

Ciclones Filtrantes

Como adiantado no Capítulo 1, o ciclone filtrante é um tipo de equipamento de separação não convencional que se diferencia dos demais, devido à existência de uma saída adicional. A existência de uma saída extra, pelo filtro, faz com que a perda de carga diminua durante a operação (RODRIGUES, 2001).

O estudo e a geração da patente apresentada por Damasceno e Barrozo (2008), é resultado de uma sequência de pesquisas realizadas na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Os trabalhos realizados pelos autores Barrozo

et al. (1992), Vieira (1997), Souza (1999) e Vieira (2001); até então com hidrociclones filtrante, serviram de base para o desenvolvimento das pesquisas voltadas a ciclones filtrante.

Em se tratando de ciclones filtrantes, somente com o trabalho de Rodrigues (2001), iniciou-se efetivamente as pesquisas com ciclones filtrantes, denominados até então de ciclones com mangas. Em seu estudo, o autor realizou uma série de experimentos em ciclones com geometrias similares ao Lapple, nos quais a parte cônica metálica fora substituída por uma parte cônica confeccionada em tecido filtrante. Foram utilizados três tipos de tecidos com diferentes permeabilidades onde avaliou-se experimentalmente o desempenho dos ciclones filtrantes operando com suspensão de pó de rocha fosfática em ar. Como resultados, o autor verificou que os números de Euler (força de pressão/força de inércia), para os ciclones filtrantes, foram sempre inferiores aos do tipo convencional. Em contrapartida, quanto às eficiências de coleta, estas foram levemente menores nos ciclones filtrantes.

Andrade et al. (2002), dando continuidade ao trabalho de Rodrigues (2001), avaliaram experimentalmente o efeito do comprimento da parte cônica sobre a performance de um ciclone com mangas. Como resultados, os autores conseguiram verificar que um aumento no tamanho da parte cônica do ciclone com mangas ocasionou uma redução no número de Euler e um pequeno aumento na eficiência global de coleta. No estudo, também foi comparado os desempenhos do ciclone convencional, com um de mesma configuração geométrica com mangas, verificando que a versão contendo cone filtrante, em todos os casos estudados, propiciou reduções consideráveis no número de Euler e um pequeno aumento no diâmetro de corte.

Somente mais tarde, com Lacerda (2007) prosseguindo com os trabalhos de Rodrigues (2001) e Andrade et al. (2002), retomou-se o estudo do já denominado ciclone filtrante. No estudo, comparou-se o desempenho de ciclones convencionais e filtrantes, através de resultados experimentais e de simulação numérica via CFD em duas dimensões. Como resultados verificou-se que os números de Euler para os ciclones filtrantes foram sempre inferiores aos do ciclone convencional, ratificando que o primeiro opera com menor queda de pressão, conseqüentemente, com menor consumo de energia. Concluiu-se também que os diâmetros de corte obtidos para os ciclones filtrantes foram superiores aos do convencional, indicando uma menor eficiência na coleta de partículas finas. No mesmo estudo, utilizando a técnica de superfície resposta, se propôs estudar a influência de quatro variáveis geométricas: diâmetro do duto de saída do *overflow*, o diâmetro do *underflow*, a altura da parte cônica e o comprimento do *vortex finder*, sobre a eficiência de separação de ciclone.

Uma adaptação de ciclones filtrantes é proposta por Fukui et al. (2011), que modifica o ciclone. No estudo, os autores propuseram um novo modelo de ciclone ao qual se introduz

um cone poroso de metal sinterizado. A diferença no modelo proposto é devido uma injeção externa de ar limpo no cone poroso. Com resultados, os autores verificaram que o controle adequado da vazão de ar injetado possibilita reduções no diâmetro de corte e na deposição de particulados na superfície do cone.

O que se observa com os poucos trabalhos existentes apresentados é que muito ainda se tem a estudar sobre ciclones filtrante. O trabalho proposto por Lacerda (2007) é o mais recente sobre ciclone filtrante. Além do mais, alguns parâmetros determinantes sobre o funcionamento de ciclones filtrantes precisam ser melhor estudados: forma de determinação da permeabilidade do meio filtrante, o efeito da vazão de alimentação sobre o desempenho do ciclone e o efeito causado pelo comprimento da altura da alimentação.

Em se tratando do estudo fluidodinâmico, verifica-se que nos trabalhos presentes na literatura pouco discutiram o processo fenomenológico de separação em ciclones filtrantes. Portanto, a proposta de simulação via CFD em 3D com regime transiente, devido à característica do escoamento em ciclones, é uma alternativa interessante que deve ser explorada.

2.1.3 Granulometria das Partículas

A análise granulométrica é a técnica que permite classificar um conjunto de partículas, conforme a distribuição dos diferentes tamanhos. Esta distribuição pode ser caracterizada por uma fração em massa de partículas (X), com diâmetro menor que D (diâmetro característico de cada análise). O conhecimento das distribuições granulométricas dos sólidos, na entrada e nas saídas de equipamentos de separação gás-sólido é fundamental para a determinação da eficiência de separação no ciclones.

As análises granulométricas podem ser feitas por diversas técnicas experimentais, sendo a mais simples o peneiramento. Existem também equipamentos mais sofisticados e caros que permitem efetuar uma análise granulométrica com boa precisão, como o equipamento *Malvern Mastersizer*. Neste trabalho, a técnica utilizada para a determinação da distribuição granulométrica do material particulado em estudo foi a técnica de difração a laser, via *Malvern Mastersizer*.

Técnica de Difração a Laser (*Malvern Mastersizer*)

A Técnica de difração a laser permite a caracterização de amostras de materiais que vão desde centenas de nanômetros a vários milímetros de tamanho. O analisador de tamanho de partícula por difração laser *Mastersizer*, em sua versão 3000 utilizado nesta

tese, é um equipamento que proporciona a obtenção de distribuições rápidas e precisas do tamanho das partículas para dispersões secas e úmidas. O funcionamento do equipamento parte da medição da intensidade da luz espalhada à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra. Esses dados são então analisados para calcular a distribuição do tamanho das partículas obtidas a partir do padrão de espalhamento gerado.

Um sistema típico do equipamento *Malvern Mastersizer* é constituído por três elementos principais:

- **Bancada óptica:** nas quais a amostra, devidamente dispersa, atravessa a área de medição da bancada óptica e um feixe de laser incide sobre as partículas. Nesta parte, uma série de detectores medem precisamente a intensidade da luz difundida pelas partículas na amostra para comprimentos de onda de luz vermelha e azul e por uma ampla gama de ângulos;
- **Unidades de dispersão de amostras:** onde a dispersão da amostra é mantido sob controle, por várias unidades de dispersão, em meio líquido ou a seco. Essas asseguram que as partículas cheguem à área de medição da bancada óptica na concentração correta e em estado de dispersão adequado e uniforme;
- **Software do instrumento:** controla o sistema durante o processo de medição e analisa os dados de espalhamento, para calcular a distribuição do tamanho das partículas. Além disso, o *software* fornece informações da medição em tempo real durante o desenvolvimento do método e uma ferramenta que, ao final da análise, avalia a qualidade dos resultados.

Detalhes mais técnicos em relação ao processo de caracterização de partículas são apresentados no capítulo 3.

2.1.4 Ajustes a Modelos de Distribuição Granulométrica

Em escala industrial, grandes quantidades dos particulados manuseados nos diversos processos não são uniformes, principalmente quanto ao tamanho das partículas. Nesses processos é fundamental o conhecimento do comportamento dinâmico do material particulado, sendo frequentemente necessário definir o sistema particulado como um todo. Sendo assim, em lugar de um único tamanho específico de partícula torna-se necessário conhecer a distribuição global de tamanhos de partículas, através da qual seja possível definir diâmetros médios que possam representar o comportamento de todos os tamanhos do material particulado em questão.

Uma variedade de modelos que apresentam funções distribuição são encontrados na literatura. No ajuste de modelos de distribuição de partículas, preferem-se os modelos com menor número de parâmetros. Dentre tais modelos, existem, alguns dos quais se ajustam muito bem ao tamanho de distribuições de diversos tipos de particulados industriais. Portanto, as opções entre os modelos a dois parâmetros que têm sido mais usados para descrever a distribuição de tamanho de partículas: *Gates-Gaudin-Schumann* (GGS), *Rosin-Rammler-Bennet* (RRB) e *Log-Normal* (LN).

Ajustes de Gates-Gaudin-Shumann (GGS)

O modelo GGS caracteriza-se por possuir dois parâmetros, conforme mostra a Equação 2.1; onde: k e m são os parâmetros do modelo, X é a fração cumulativa e D é o diâmetro da Partícula.

$$X = \left(\frac{D}{K} \right)^m \quad (2.1)$$

Ajuste Log Normal

O ajuste Log-Normal é representado pela Equação 2.2, onde: D_{50} e δ são os parâmetros do modelo.

$$X = \left(\frac{1 + erf(z)}{2} \right) \quad (2.2)$$

onde:

$$z = \ln \left(\frac{D/D_{50}}{\sqrt{2 \ln \delta}} \right) \quad (2.3)$$

$$erf = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz \right) \quad (2.4)$$

A representação gráfica do modelo Log-Normal fornece sempre uma curva em S .

Ajuste de *Rosin-Rammler-Bennet* (RRB)

O modelo RRB é caracterizado por possuir dois parâmetros ajustáveis. É uma função simples que relaciona diretamente o diâmetro D da partícula com a fração em massa de partículas com diâmetros menores que D , conforme mostra a Equação 2.5, onde n e D' são os parâmetros do modelo e X e D são a fração cumulativa e diâmetro da partícula respectivamente.

$$X = 1 - \left[\exp - \left(\frac{D}{D'} \right)^n \right] \quad (2.5)$$

2.1.5 Eficiência de Separação em Ciclone

Todos os princípios que norteiam o escoamento em ciclone têm como finalidade a separação de sólidos, a partir de um escoamento de gás carregado de partículas. Sendo assim, é de fundamental importância mensurar o quanto eficiente será a separação. A coleta de partículas no interior de um ciclone é, naturalmente, o resultado da ação de forças que agem sobre elas, onde a força resultante vai carrear os sólidos até as paredes do ciclone.

Na literatura sempre são apresentadas as forças centrífuga, de arraste e gravitacional como sendo as mais importantes no processo de separação. Entretanto, além dessas, podem atuar outras forças ainda não inteiramente compreendidas e que muitas vezes são desconsideradas, como as forças de interação partículas-partículas e partículas-superfície do ciclone (CORTES; GIL, 2007).

A eficiência em ciclones pode ser influenciada por uma série de fatores, tais como: as condições de operação, as propriedades físicas do material particulado e a geometria do ciclone. O aumento da velocidade de entrada aumenta a força centrífuga e a eficiência, mas em contrapartida, faz com que a queda de pressão também aumente se acentue. A diminuição da viscosidade do gás aumenta também a eficiência, pois a força de arraste é diminuída (FABIAO et al., 2010).

A capacidade de retenção de partículas de um ciclone é medida pela sua eficiência global de coleta ($\bar{\eta}$), definida como a fração de sólidos alimentados que são coletados no ciclone. A eficiência global é geralmente o que mais se interessa em se tratando de um processo industrial. Entretanto, quando se deseja avaliar o desempenho do ciclone para um determinado tamanho de partícula, esta não é a melhor forma de se quantificar a eficiência.

Devido as amostras de partículas no ciclone apresentarem diferentes tamanhos, é comum e bastante usual identificar a eficiência de separação referente a um tamanho específico de partícula (D). Para determinados tamanhos de partículas, tem-se uma função contínua $\eta(D)$, que pode ser definida como uma função eficiência individual de coleta do ciclone, relativa aos tamanhos de partículas D . Hoffmann e Stein (2002) apresenta um modelo matemático com a definição de $\eta(D)$, em relação a $\bar{\eta}$. Entretanto, o inverso da relação proposta por Hoffmann e Stein (2002) pode ser apresentada de uma forma diferente, levando a uma relação um tanto mais significativa: se $X(D)$ é a distribuição de tamanhos de partículas, na entrada do ciclone, tem-se uma relação direta para a eficiência global de coleta $\bar{\eta}$ apresentada pela Equação 2.6.

$$\bar{\eta} = \int_0^{\infty} X(D)\eta(D)dD \quad (2.6)$$

A eficiência individual de coleta pode ser definida como o fator real de medida da eficiência do ciclone. Pela sua própria definição, tal fator depende apenas das características do ciclone, e não da distribuição de partículas da alimentação; ao contrário do que se vê na Equação 2.6, onde a eficiência global depende: tanto distribuição granulométrica, como das dimensões do ciclone.

Eficiência Individual de Coleta

A eficiência individual de coleta é definida como a fração mássica de sólidos alimentada que é capturada pelo ciclone, para partículas de um determinado diâmetro. O gráfico de eficiência individual de coleta com o diâmetro de partícula é chamado de Curva de Eficiência do ciclone. Uma curva de eficiência típica é mostrada na Figura 2.1.

Conforme Massarani (1997), a eficiência individual de coleta relativa à partícula com diâmetro D pode ser expressa de acordo algumas correlações empíricas para ciclones. Segundo o autor, a eficiência individual de coleta $\eta\left(\frac{D}{D^*}\right)$ depende exclusivamente da configuração do equipamento, do regime de escoamento do fluido e da dinâmica das partículas. Ciclones de *Lapple* e de *Stairmand* apresentam o modelo empírico apresentado conforme Equação 2.7

$$\eta\left(\frac{D}{D^*}\right) = \frac{\left(\frac{D}{D^*}\right)^2}{1 + \left(\frac{D}{D^*}\right)^2} \quad (2.7)$$

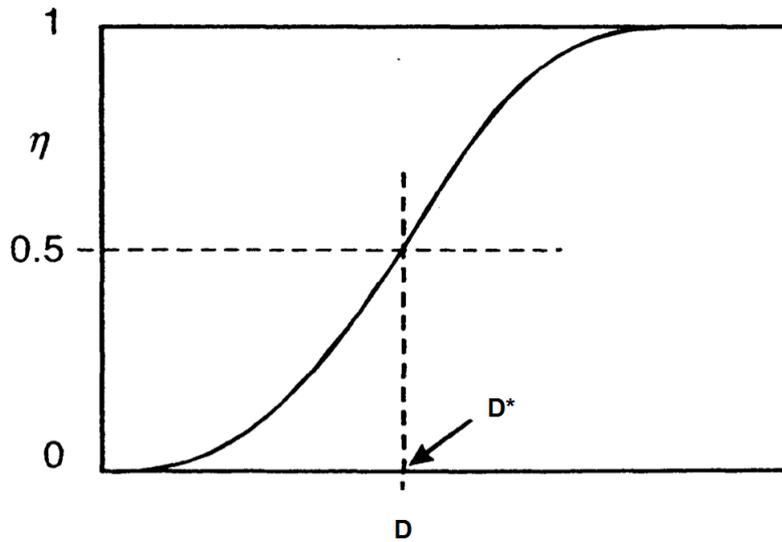


Figura 2.1: Curva de eficiência típica no ciclone (HOFFMANN; STEIN, 2007).

Eficiência Total ou Global de Coleta

É a relação entre a quantidade de particulados coletados no ciclone e o total alimentado. A função eficiência global de coleta depende da distribuição granulométrica da amostra de partículas, $X = X(D)$. Conhecida a distribuição granulométrica, é possível estabelecer o valor da eficiência global de coleta no campo centrífugo conforme a Equação 2.8 :

$$\bar{\eta} = \int_0^1 \eta \left(\frac{D}{D^*} \right) dX \quad (2.8)$$

A integração da Equação 2.8, para uma situação bastante típica de distribuição granulométrica, representada pelo modelo Rosin-Rannler-Bennet (RRB), descrito pela Equação 2.9, resulta na Equação 2.10, quando aplicada aos tipos de ciclones de *Lapple* e de *Stairmand*. Quanto à Equação 2.9, cabe ressaltar que X é a fração em massa das partículas com diâmetro menor que D e que D' e n são os parâmetros do modelo, respectivamente: diâmetro da partícula que corresponde a $X = 0,632$ e a dispersão (MASSARANI, 1997).

$$X = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D}{D'} \right)^n \right] \quad (2.9)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\frac{1,11n}{0,118+n}}{1,81 - 0,322n + \left(\frac{D'}{D^*} \right)} \cdot \frac{D'}{D^*} \quad (2.10)$$

2.2 Filtração

A filtração é uma operação de separação física, que é usado para a separar partículas de uma corrente gasosa, via a interposição para as correntes gasosas. No caso de ciclone filtrante, apenas os gás (ar) passa pelo filtro, enquanto as partículas são coletadas. A eficiência de coleta do filtro depende da porosidade, densidade de empacotamento, velocidade nominal, o tamanho das partículas e a espessura do filtro, conforme regem os mecanismos físicos da filtração (SEVILLE, 1997).

Durante o processo, o filtro pode reter o sólido da suspensão sobre a superfície do meio de filtrante, formando o que denominamos de torta de filtração. A formação da torta ocorre naturalmente quando os poros do meio filtrante são menores do que as partículas. Se não for este o caso, é necessário, para cobrir o meio de filtrante, uma folha fina de um material fibroso, chamado auxiliar de filtro que bloqueia as partículas passantes pelo meio filtrante. A formação de tortas são características em filtração cujo meio filtrante é perpendicular ao sentido do escoamento.

Quando o escoamento da suspensão sólido fluido é paralela à superfície do meio filtrante, o meio retém as partículas, permitindo que o fluido passe. No entanto, dado à características do escoamento, que produz uma elevada tensão de cisalhamento nas superfícies sólidas, a formação de uma camada sólida (torta de filtração) sobre o meio de filtrante é evitada, fazendo com que as partículas voltem para a suspensão (CONCHA, 2014). A não formação de torta é uma característica muito comum em filtração de fluxo cruzado, mas também pode ser observada no processo de filtração que ocorre em ciclone filtrante (RODRIGUES, 2001).

2.2.1 Equações do Escoamento de uma Única Fase em Meio Poroso

Para um escoamento de um fluido viscoso, através de um meio poroso, onde sejam válidas as seguintes hipótese: as partículas são pequenas em relação ao recipiente, apresentando tamanhos e formas uniformes, o meio poroso é incompressível, rígido e indeformável, não há transferência de massa entre o sólido e o fluido e as partículas estão contidos num recipiente com paredes impermeáveis sem atrito; o processo pode ser descrito a partir dos sistemas de Equações para partículas, muito bem apresentado por Massarani (1997).

O escoamento através do meio poroso rígido, pode ser descrito pelas leis da continuidade e de momento, aplicadas a meios poroso. Considerando um balanço no volume

fluido incompressível, sendo este a parte dinâmica, chega-se à equação:

$$\rho \left[\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{v}_f) \right] = 0 \quad (2.11)$$

O balanço de massa para a mistura no volume de fluido é:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{q} &= 0 \\ \mathbf{q} &= \varepsilon \mathbf{v}_f \\ v_s &= 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

O balanço de momento linear no volume de fluido é:

$$\nabla p_e = -\frac{\mathbf{m}_d}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

em que o \mathbf{r} é o vetor posição, $\varepsilon(\mathbf{r}, t) = (1 - \varphi(\mathbf{r}, t))$ é a porosidade do meio, $\varphi(\mathbf{r}, t)$ é a fração volumétrica do sólido, $\mathbf{v}_f(\mathbf{r}, t)$ é a velocidade intersticial do fluido, $\mathbf{q}(\mathbf{r}, t)$ é a velocidade superficial do fluido, $p_e(\mathbf{r}, t)$ é a pressão exercida nos poros sobre o fluido e $\mathbf{m}_d(\mathbf{r}, t)$ a força resistiva exercida pelo fluido sobre o meio poroso. A força resistiva $\mathbf{m}_d(\mathbf{r}, t)$ será descrito posteriormente pelas leis Darcy, Forchheimer, a depender da velocidade do escoamento.

2.2.2 Fundamentos de Filtração

Em 1856, é proposta por Darcy a primeira correlação experimental para o fluxo viscoso, através de um meio poroso incompressível, formado por partículas fixas. Darcy estabelecia uma relação linear entre o fluxo de volume por unidade de área e a queda de pressão através do leito poroso. Desde então, os escoamentos lentos, através de meios porosos, são tratados pela lei de Darcy.

Durante muito tempo, a fim de prever a queda de pressão sobre um meio poroso, a relação entre queda de pressão, velocidade superficial e permeabilidade do material poroso fora previsto pela lei de Darcy, Equação 2.14; onde \mathbf{q} é a velocidade superficial ($m s^{-1}$), μ a viscosidade (Pa.s) e K é a constante de permeabilidade do meio filtrante (m^2).

$$-\nabla p = \frac{\mu}{K} \mathbf{q} \quad (2.14)$$

Embora a lei de Darcy, seja bastante utilizada, para escoamentos em filtros, esta apresenta duas limitações (LAGE, 1998): (1) a vazão volumétrica do escoamento deve

ser baixa, sendo válida essencialmente no regime laminar, para fluido incompressível, newtoniano e isotérmico; (2) a lei de Darcy é uma equação diferencial de primeira ordem, diferentemente da equação de *Stokes*, que é uma equação diferencial de segunda ordem. Algumas implicações físicas oriundas da não aplicabilidades da equação de Darcy são apresentadas e discutidas por Lage (1998).

Uma evolução à equação de Darcy, para escoamentos em altas velocidades, é a equação de *Forchheimer*, estabelecida pela Equação 2.15, onde o parâmetro β é o coeficiente de resistência cinética e depende das condições do escoamento, sendo determinada experimentalmente.

$$-\nabla p = \frac{\mu}{K} \mathbf{q} + \rho \beta \mathbf{q}^2 \quad (2.15)$$

Outra correlação existente na literatura, que descreve o escoamento em meio poroso é apresentada na Equação 2.16, proposta por Massarani (1989). que ao observar que a correlação apresentada por Darcy não era universalmente válida, sendo restrita a escoamentos lentos, Massarani (1989) propôs uma extensão para escoamentos mais rápidos, através da teoria de escoamento em meios porosos e a equação do movimento; que fora a integrada com a expressão para força resistiva de *Forchheimer*.

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\mu}{K} \mathbf{q} + \frac{c\rho}{\sqrt{K}} \mathbf{q}^2 \quad (2.16)$$

Ao longo dos anos, várias Equações têm sido propostas a fim de definir a dependência da permeabilidade e do parâmetro c com a porosidade. Segundo Concha (2014), as Equações mais utilizadas são aquelas propostas por Kozeny (1927), Carman (1937) e Massarani (1997).

2.2.3 Variáveis importantes na Filtração em tecido

Uma característica importante ao analisar os fenômenos de transporte em meios porosos é a presença de dois materiais homogêneos, sendo um fixo ou ligeiramente deformável e o outro móvel, no qual existe uma superfície que os separam. A superfície normalmente é caracterizada por uma porosidade volumétrica (ϵ) e pela permeabilidade (K) (NARASIMHAN, 2012).

Segundo Seville (1997), ao se analisar o processo de filtração em tecidos, o sucesso no projeto e na operação dependem da associação de quatro variáveis de projeto:

- a perda de carga;
- a velocidade de filtração;
- o meio filtrante;
- a técnica de limpeza.

A seguir, serão discutidos os efeitos associados à perda de carga, à velocidade de filtração e à permeabilidade do meio filtrante.

Queda de pressão no filtro

A perda de carga em um filtro é a pressão diferencial entre as tomadas de pressão nos lados opostos de um filtro. A perda de carga em um filtro tende a aumentar à medida que partículas são coletadas na superfície dos mesmos. O aumento da perda de carga durante o ciclo de filtração é uma indicação importante, pois determina a frequência de limpeza e consequentemente o tempo de vida do filtro.

A perda de carga máxima em um filtro pode ser utilizada para determinar a potência requerida. Normalmente, a perda de carga máxima é o fator limitante que determina quando a limpeza deve ser feita. Desta maneira, os ciclos de limpeza dos filtros são acionados, através do controle da perda de carga, ou seja, quando um valor máximo de perda de carga é alcançado. Os valores de perdas de carga operacionais, normalmente se encontram na faixa de 750 a 2000 Pa (SEVILLE, 1997).

Existem na literatura diferentes equações utilizadas para descrever a queda de pressão em processos de filtração. Uma delas é a correlação apresentada pela Equação 2.17, em que a queda de pressão total no filtro (ΔP_T) é a soma da queda de pressão no meio filtrante (ΔP_m) e a queda de pressão devido à torta de filtração formada (ΔP_C). Entretanto, a Equação 2.17 não deve ser a equação a ser utilizada em ciclones filtrantes, pois; conforme Rodrigues (2001), em função às forças cisalhantes, a formação da torta é impedida.

$$\Delta P_T = \Delta P_m + \Delta P_C \quad (2.17)$$

Velocidade de filtração

A velocidade de filtração do gás na interface de um tecido é denominada de velocidade superficial de filtração. Esta é a variável, que através da vazão do gás, possibilita a determinação da área total efetiva de filtração (SEVILLE, 1997). A velocidade de filtração

é um parâmetro fundamental de projeto para filtros de tecido, pois em conjunto com o método de limpeza utilizado, possibilita determinar as dimensões do filtro e a estimativa inicial de custo, uma vez que influencia significativamente no custo energético.

Permeabilidade do Meio Filtrante

A permeabilidade, uma propriedade que depende exclusivamente da matriz porosa, é o fator que determina o grau de facilidade com que um fluido se move em um meio poroso, sob influência de um gradiente de pressão (MASSARANI, 1997).

Lage (1998) discute a teoria por trás da lei de Darcy, reafirmando alguns conceitos importantes:

1. quaisquer dados experimentais podem ser ajustados utilizando Equações lineares ou quadráticas;
2. a permeabilidade e o coeficiente de resistência inercial são valores obtidos a partir de ajustes aos resultados experimentais e dependem de uma variedade de dados.

Segundo Seville (1997), a permeabilidade do meio filtrante, para fluxo de gás, é determinada pela estrutura dos tecidos, resultante de entrelaçamentos dos fios de fibras formadas. Quando novos, os tecidos disponibilizam poros com aberturas significativamente maiores que o tamanho das partículas. Com isso, durante a filtração, inicialmente a permeabilidade do gás é predominantemente maior, pois o meio filtrante oferece menor resistência ao escoamento. Entretanto, após algum tempo de funcionamento, algumas partículas atravessam o meio filtrante, aparecendo no efluente, enquanto outras são coletadas na superfície do tecido ou no interior da estrutura, diminuindo assim a permeabilidade do meio filtrante.

A permeabilidade foi apresentada nas Equações 2.14, 2.15 e 2.16, referentes às correlações de Darcy, *Forchheimer* e Massarani respectivamente. Em todas as Equações, a permeabilidade representa o resultado da predominância das forças viscosas no escoamento. Em elevados números de *Reynolds*, predomina-se as forças inerciais, dando o caráter parabólico para a força resistiva, característico da Equação 2.15, proposta por *Forchheimer*.

As Equações de Darcy, *Forchheimer* e Massarani são utilizadas como Equações constitutivas para as forças relativas de interação gás-sólido (CONCHA, 2014). No seu livro, o autor aborda a definição de permeabilidade, associando sua relação com a geometria do meio poroso, onde se aplicou o caso para um escoamento de um fluido viscoso através de

uma matriz porosa, rígida e horizontal, com porosidade constante. Com a obtenção de uma equação final, o autor mostra que, a partir de dados de pressão e velocidade superficial, ajustados à equação, possibilita a determinação da permeabilidade, o que ratifica a metodologia de permeamtria apresentada por Massarani (1997).

Para escoamentos em meio não saturados, a permeabilidade do meio poroso depende exclusivamente da estrutura da matriz porosa, sendo independente do regime de escoamento, somente quando a pressão do ar for muito maior do que peso do ar no meio poroso (CONCHA, 2014).

O manual do *software* FLUENT apresenta um modelo representado pela Equação 2.18, análoga à equação de *Forchheimer*, que descreve o escoamento em meio porosos, para escoamentos monofásico e multifásicos, utilizando a velocidade superficial (FLUENT, 2011). Na Equação 2.18, K é a permeabilidade do meio filtrante e C_2 é o coeficiente de resistência inercial, podendo ambos serem determinados experimentalmente, a partir de dados empíricos de vazão volumétrica e queda de pressão no meio poroso. Nota-se que existe uma analogia entre as Equações 2.18 e 2.15.

$$-\nabla p = \frac{\mu}{K} \mathbf{q} + \frac{1}{2} \rho C_2 \mathbf{q}^2 \quad (2.18)$$

Analisando o modelo proposto, a depender das coordenadas geométricas utilizadas, os coeficientes lineares e quadráticos, do ajuste ao dados experimentais, possibilita a determinação de K e C_2 , uma vez que os valores de viscosidade dinâmica (μ) e massa específica (ρ) são conhecidos.

Nos processos industriais, dada à praticidade, é utilizado a coordenada cartesiana plana, para a configuração dos filtros. Entretanto, segundo Massarani (1985), a filtração sobre uma superfície cilíndrica ou esférica proporciona uma capacidade de filtração superior, pois, com o crescimento da torta, a área de filtração aumenta com o tempo, conforme é apresentado na Figura 2.2

2.3 Escoamento no Interior de Ciclones

Em equipamentos centrífugos, como o ciclone, o gás contendo partículas, apresenta um escoamento giratório em forma de vórtice. O escoamento em vórtice é provocado devido o fato do fluxo de alimentação ser tangencial ao corpo de cilindro, ao qual, normalmente apresenta uma seção de entrada retangular. À medida que o gás avança no interior do ciclone, este gira e se move na direção axial para baixo. Na parte cônica, o gás é forçado

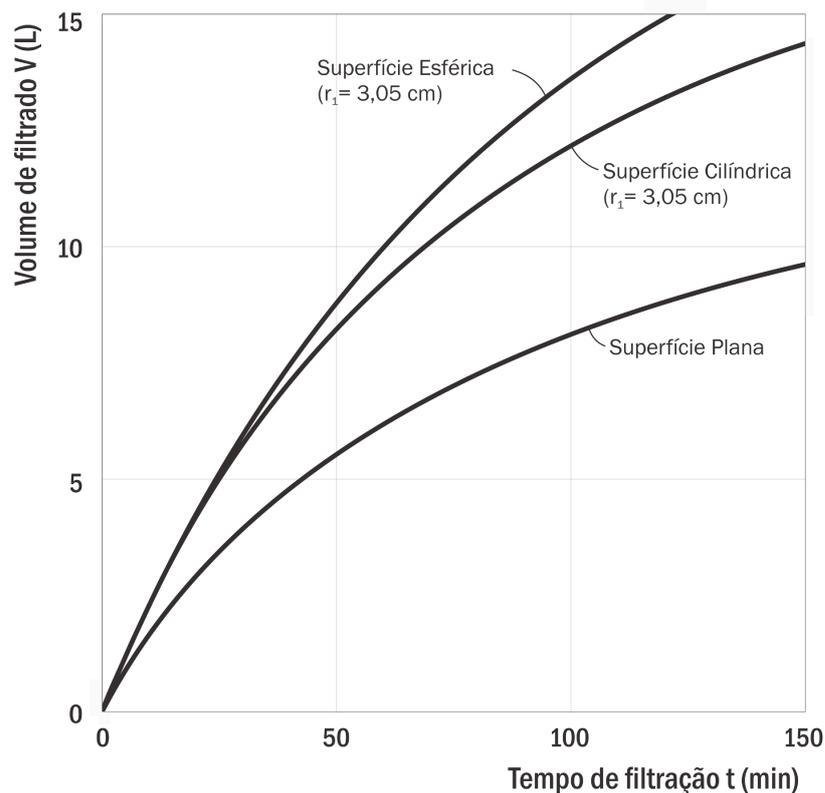


Figura 2.2: Filtrações plana e radial (MASSARANI, 1985).

a se dirigir para a região interna do ciclone, onde o movimento axial é invertido para cima. Este comportamento padrão de escoamento é muitas vezes denominado como duplo vórtice: um vórtice externo com fluxo axial dirigido para baixo (*free vortex*), e o outro interno com fluxo direcionado para cima (*forced vortex*). O gás limpo deixa o ciclone pelo *vortex finder*. As partículas, presentes no vórtice externo, são levadas para fora devido o campo centrífugo, sendo transportadas axialmente para baixo, próximo à parede, até serem coletadas no *underflow*, conforme esquema padrão apresentado na Figura 2.3.

A geometria do ciclone com entrada tangencial é caracterizada por um conjunto de oito dimensões, apresentadas na Figura 2.3, como:

1. o diâmetro do cilindro (D);
2. a altura total do ciclone (H_t);
3. o diâmetro do *vortex finder* (D_X);
4. o comprimento do *vortex finder* (S);
5. a altura da entrada de alimentação (a);
6. a largura de entrada de alimentação (b);

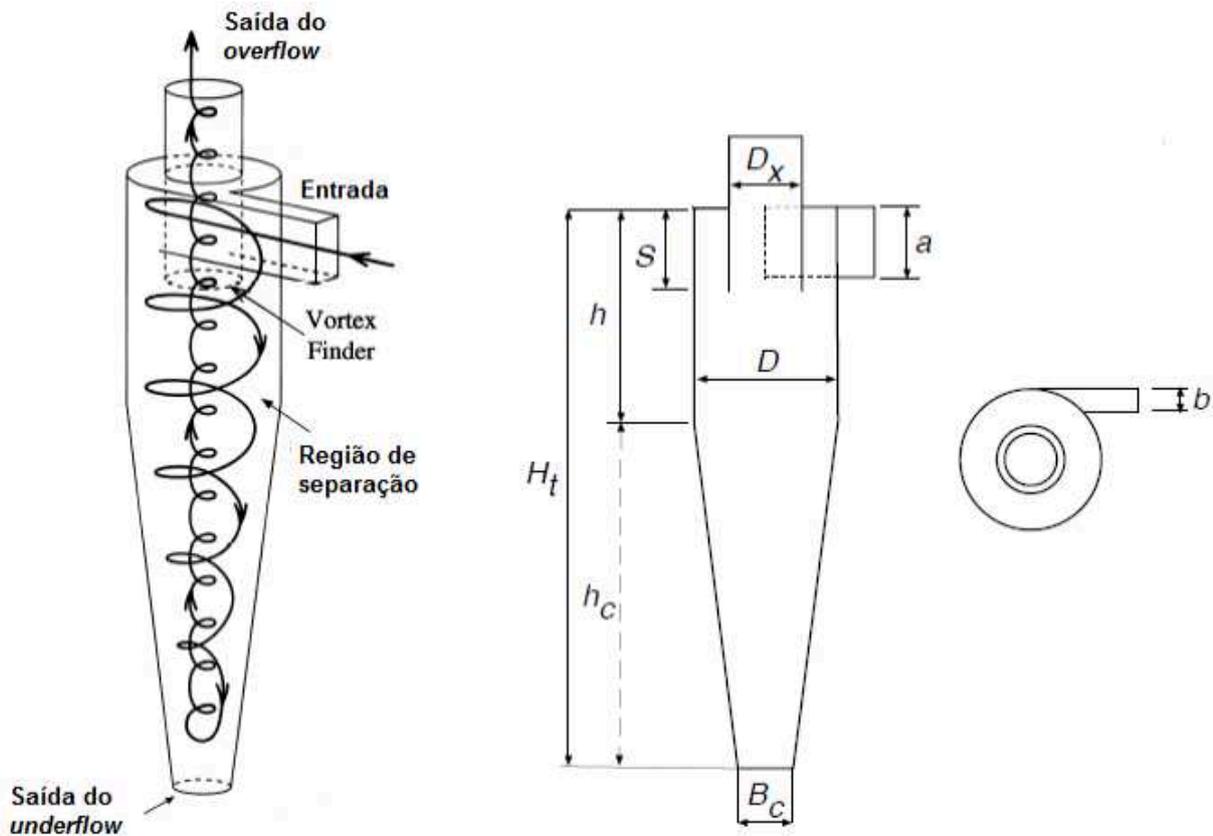


Figura 2.3: Escoamento em ciclone (ELSAIED; LACOR, 2011a).

7. a altura da seção cônica h_c ou do cilindro (h);
8. o diâmetro do fundo do cone ou diâmetro do *underflow* (B_c);

No ciclone as partículas são separadas do gás ao serem levadas contra a parede pela ação da força centrífuga. Admite-se que as partículas se movem com uma velocidade tangencial igual à do gás, e uma velocidade radial v_r . As forças que agem em uma partícula no corpo do ciclone, na direção radial, são a força centrífuga, dada pela Equação 2.19, e a força de arraste, que, para $Re < 1$, é geralmente expressa pela lei de *Stokes* apresentado pela Equação 2.20, em que D_p é o diâmetro da partícula, ρ_p é a massa específica da partícula, r é a distância da partícula ao eixo do ciclone, μ é a viscosidade do gás e v_r é a velocidade radial do gás.

$$F_c = \frac{\pi D_p^3 \rho_p v_t^2}{6r} \quad (2.19)$$

$$F_d = 3\pi\mu D_p (u_r - v_r) \quad (2.20)$$

Segundo Cortes e Gil (2007), a explicação básica para o princípio de separação em

um ciclone é de que as partículas sólidas, mais densas que o gás, tornam-se sujeitas a uma força centrífuga de maior intensidade, de modo que estas são direcionadas às paredes. Ao colidir com as paredes, as partículas perdem quantidade de movimento e se separam do escoamento. Os sólidos então separados cisalham pela parede cônica e são coletados na parte inferior. Entretanto, cabe ressaltar que existem outros fenômenos que devem ser considerados, pois interferem no processo de separação: partículas pequenas que seguem o gás, partículas que rebatem e são re-introduzidas na corrente gasosa e o arraste direto ou *by-pass* na parte inferior da seção cônica, na entrada do *vortex finder* e em toda a extensão da fronteira entre os vórtices interno e externo.

2.3.1 Componentes de Velocidades em Ciclone

Escoamento giratório ou em vórtice está presente em vários tipos de equipamento, tais como: ciclones, hidrociclones, *spray dryers* e outros (HOFFMANN; STEIN, 2007). Este tipo de escoamento, apresenta duas características físicas bem peculiares, conforme a Figura 2.4, que podem ser definidas:

- o escoamento de vórtice forçado, *forced vortex flow*, no qual o fluxo apresenta a mesma distribuição de velocidades tangencial de um corpo sólido em rotação.
- o escoamento de vórtice livre, *free vortex flow*, é o fluxo giratório similar ao escoamento sem atrito, onde o fluxo apresentaria a velocidade tangencial correspondente a uma velocidade angular constante ao longo de todos os raios .

O ponto de velocidade tangencial máxima é definido como o raio do vórtice interno. A velocidade neste ponto pode chegar a valores várias vezes superior a velocidade média de entrada. O diâmetro do vórtice interno varia aproximadamente de 0,5 a 1,0 vezes o raio do *vortex finder* (LEITH et al., 1984). A variação axial do perfil de velocidade tangencial é baixa, principalmente na região de separação do ciclone, composta pelo corpo cilíndrico e cônico.

Componente Tangencial de Velocidade no Ciclone

Em um escoamento ideal com *swirl*, giratório, de um fluido com viscosidade infinita, apresentando características bem próximas do comportamento de um sólido, não existe cisalhamento entre as camadas adjacentes em diferentes raios. Neste caso, os elementos em todas as posições radiais possuem a mesma velocidade angular e a velocidade tangencial neste escoamento é dada pela Equação 2.21. Em que Ω é a velocidade angular e r é o

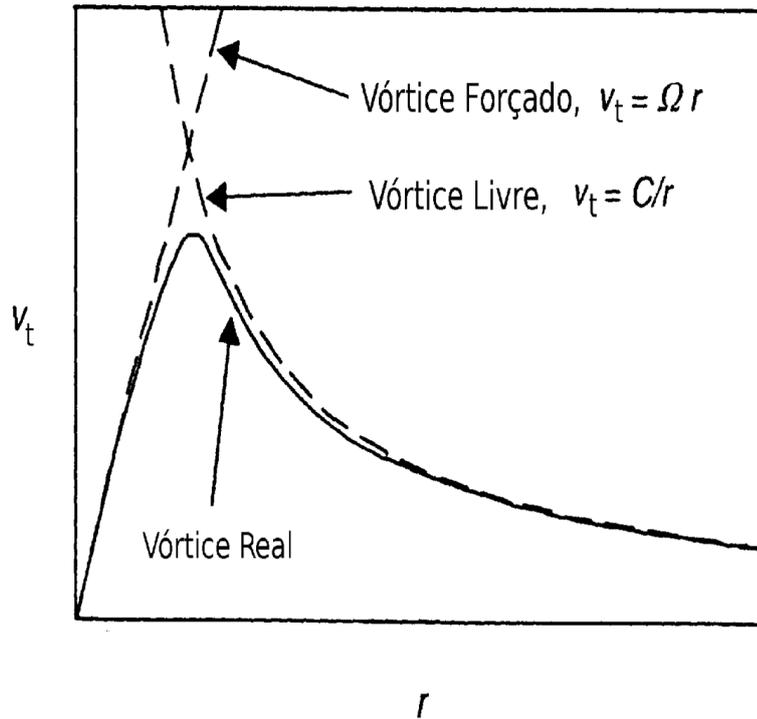


Figura 2.4: Perfil de velocidade tangencial na região de separação em um ciclone (HOFFMANN; STEIN, 2007).

raio. Esta é a distribuição de velocidades para o primeiro tipo ideal de escoamento com *swirl*, denominado de escoamento com vórtice forçado.

$$v_t = \Omega r \quad (2.21)$$

Em um escoamento com *swirl*, de um fluido invíscido, no qual o movimento de um dado elemento de fluido não é influenciado pelos elementos de fluidos vizinhos, há portanto uma conservação de momento angular e a velocidade tangencial então é dada pela Equação 2.22, em que C é uma constante. Este é o segundo tipo de escoamento ideal com *swirl* ideal é denominado de escoamento com vórtice livre.

$$v_t = \frac{C}{r} \quad (2.22)$$

Entretanto, no caso de um escoamento real, o fluido terá uma viscosidade finita não-nula e existirá transferência de momento angular entre elementos de diferentes camadas adjacentes; Neste caso, uma transferência de momento angular adicional acontece por qualquer nível de turbulência presente no escoamento, pois esta promove a troca de elementos de fluidos entre as camadas (HOFFMANN; STEIN, 2007).

Componente Axial de Velocidade em Ciclones

A velocidade axial é responsável, mais do que a gravidade, pelo transporte de partículas para o equipamento de coleta. De forma geral, o gás escoar na direção descendente perto da parede e ascendente perto do eixo do ciclone. O escoamento descendente apresenta um máximo próximo à parede, e o escoamento ascendente apresenta perfis em formato de V ou W, com um máximo ou um declive no eixo de simetria, em se tratando de ciclone convencional (CORTES; GIL, 2007).

Componente Radial de Velocidade em Ciclones

A componente radial de velocidade é a que apresenta maior dificuldade de medição. Geralmente, assume-se que possui magnitude muito menor que as outras componentes, consideração válida quando é considerado somente a região do vórtice externo. A velocidade radial aumenta significativamente próximo ao centro do vórtice, direcionada ao centro, especialmente na vizinhança do *vortex finder* (CORTES; GIL, 2007).

2.3.2 Características Adicionais do Escoamento do Gás

Precessing Vortex Core

O fenômeno do *Precessing Vortex Core* (PVC) é uma instabilidade que acontece em escoamentos rotatórios, em determinadas condições de operação. Para ciclones, operando em condições encontradas industrialmente, o PVC quase sempre estará presente. Nestas condições, o vórtice central não está alinhado com o eixo de simetria do ciclone, apresentando um movimento de precessão em torno deste. Este movimento cria um alto nível de flutuação no campo de escoamento, principalmente na região central do ciclone, e também influencia na separação de partículas.

Yazdabadi et al. (1994), apresenta um novo modelo para descrever o PVC, demonstrando de forma clara, que o fenômeno é causado pelo deslocamento real do vórtice interno e pelo giro em torno do centro geométrico do sistema. No estudo, foram avaliadas as características gerais do fenômeno PVC em ciclones. Os autores analisaram o efeito do PVC sobre a região de inversão do escoamento e a relação entre ambos. Como conclusão principal, verificaram que a zona de inversão do escoamento, desloca o vórtice interno (central), gerando o PVC. No estudo também verificou-se que o comprimento e posição do PVC são alterados pelo número de *Reynolds*.

No ciclone, o fenômeno *precessing vortex core* (PVC) está presente em quase todas as

posições axiais do ciclone, o que leva a oscilações no eixo central do vórtice periodicamente, de modo que o campo de escoamento seja naturalmente transiente (WU et al., 2007).

Precessing Vortex End

O fenômeno denominado *Precessing vortex end* (PVE), onde termina o vórtice, influencia significativamente no comportamento de ciclones. As características desse fenômeno e os fatores que determinam sua posição devem ser bem compreendidos ao se analisar o comportamento em ciclones, tanto que vem sendo exaustivamente pesquisados (HOFFMANN; STEIN, 2007).

A posição onde o vórtice externo inverte, para cima no ciclone, é denominado de *vortex end*. A distância axial entre o *vortex Finder* e o *vortex end* é o que denomina de comprimento natural do vórtice, sendo uma variável importante ao se analisar o desempenho de ciclones. Caso o vórtice não preencha o volume do ciclone e não atinja vértice do cone, a estrutura de duplo vórtice é deformada e a eficiência de separação diminui. O mesmo pode acontecer com a eficiência, caso o comprimento do vórtice seja excessivo. Portanto o vórtice deve apresentar um *vortex end*, que proporcione um comprimento igual ou ligeiramente maior que o comprimento do ciclone para uma elevada eficiência (AVCI et al., 2013).

Escoamentos Secundários

A expansão do gás no interior do ciclone gera uma região de escoamento muito complexo e bastante turbulento. Devido a forte turbulência no interior do ciclone, e diferentes campos de pressão, o escoamento giratório propicia regiões de curto-circuito e recirculação, que fazem com que o escoamento no interior do ciclone se torne ainda mais turbulento, como pode ser observado na Figura 2.5.

Segundo Yazdabadi et al. (1994), a existência de uma zona de recirculação no centro do vórtice é uma característica dos escoamentos rotatório, e se desenvolve em escoamentos com números de *swirl* acima de um valor crítico, tipicamente 0,6. As características presentes no escoamento no interior do ciclone, devido a presença de escoamentos secundários foram analisada por Cortes e Gil (2007) e Wang et al. (2011).

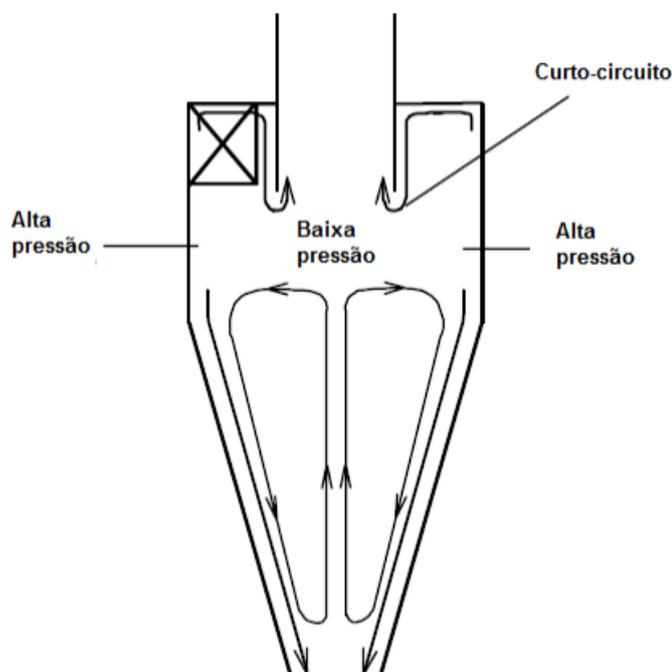


Figura 2.5: Os escoamentos secundários causados pela turbulência no ciclone (HOFFMANN; STEIN, 2007).

2.3.3 Queda de Pressão

A pressão total em qualquer ponto do ciclone é dada pela soma da pressão estática com a pressão dinâmica naquele ponto. A pressão total no ciclone decresce monotonicamente de um máximo valor na parede para um valor mínimo no centro. Por causa dos altos valores de velocidade tangencial presentes, a pressão dinâmica atinge valores tão altos que a pressão estática assume valores negativos com relação à pressão atmosférica (LEITH et al., 1984). A Figura 2.6 mostra os perfis medidos por Linden apud (LEITH et al., 1984) das componentes de velocidade e da pressão na região de separação de um ciclone.

A perda de carga no ciclone é um importante parâmetro de desempenho do ciclone. Podem ser citadas três contribuições principais para a queda de pressão no interior de um ciclone:

- perdas na entrada;
- perdas na região de separação;
- perdas no *vortex finder*;

As perdas associadas à alimentação (entrada) se refere às perdas associadas à expansão do gás ao entrar no corpo do ciclone, e pode ser desconsiderada, em muitas situações, por

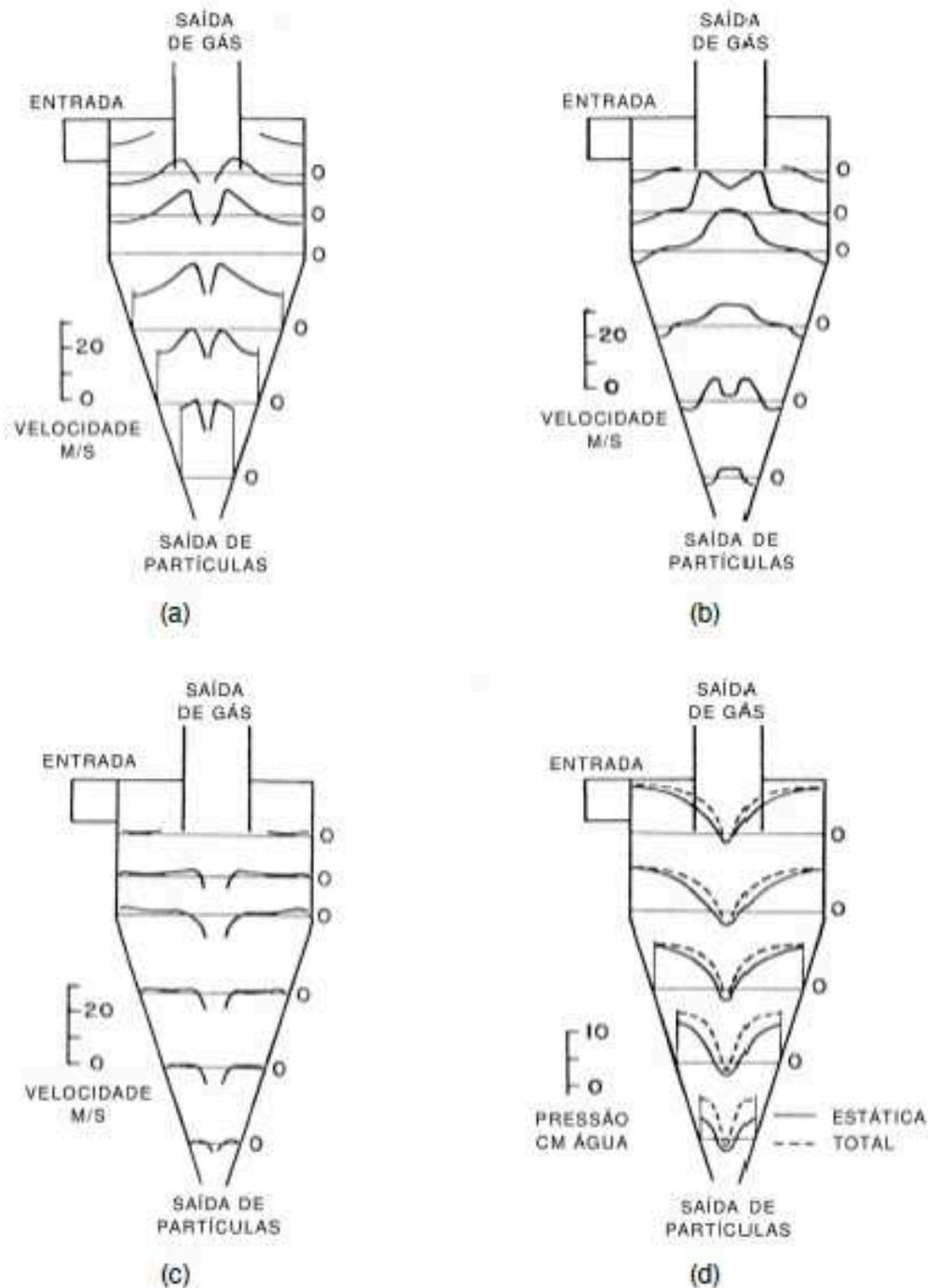


Figura 2.6: Perfis radiais de (a) Velocidade Tangencial, (b) Velocidade Axial, (c) Velocidade Radial e (d) Pressão (LEITH et al., 1984).

ser muito menor, quando comparadas com as demais contribuições (CHEN; SHI, 2007). As perdas na região de separação incluem as perdas por atrito na parede e devido à formação do vórtice (LEITH et al., 1984). A última contribuição se refere às perdas de carga sofridas na entrada do *vortex finder*.

Existem na literatura uma variedade de modelos empíricos que buscam descrever a queda de pressão em ciclones. Ogawa (1984) apresenta uma equação empírica para a

perda de carga no o escoamento de gás em ciclones que pode ser dada pela Equação 2.23, em que v_i é a velocidade média de entrada, ρ é a massa específica do gás e ζ_c é chamado de coeficiente de perda de carga. Este coeficiente é função, principalmente, da geometria do ciclone.

$$\Delta p = \zeta_c \rho \frac{v_i^2}{2} \quad (2.23)$$

Existem muitas expressões para o cálculo de ζ_c , sendo que algumas são bastantes simples, como a de Lapple e Shepherd (apud (LEITH et al., 1984)), dada pela Equação 2.24

$$\zeta_c = 16 \frac{ab}{D_x^2} \quad (2.24)$$

Conforme Massarani (1997), a queda de pressão no ciclone está associada à vazão de alimentação no ciclone. Segundo o autor, a queda de pressão oriunda da diferença de pressão entre a entrada da alimentação e saída do *overflow* pode ser obtida a partir da Equação 2.25.

$$\beta = \frac{-\Delta p}{\rho u_c^2 / 2} \quad (2.25)$$

$$u_c = \frac{Q}{\pi D_c^2 / 4} \quad (2.26)$$

Nas Equações 2.25 e 2.26, u_c e Q são a velocidade média no interior do ciclone e a vazão volumétrica de fluido, respectivamente. O parâmetro β é o número de Euler e depende das configurações geométricas do equipamento e está associado ao custo energético do equipamento.

Ao medir a queda de pressão em ciclones, primeiro há que se definir o que realmente é essa diferença de pressão entre a alimentação e a saída do *overflow*. No escoamento giratório em ciclones, as contribuições de pressões estática e dinâmica para a pressão total variam fortemente em todo o equipamento. Diferentemente de outros equipamento com distribuição uniforme de pressão, no ciclone, segundo Hoffmann e Stein (2007), a pressão a ser medida entre a entrada do ciclone e a saída do *overflow* deve ser a pressão total, uma vez que a queda de pressão total de pressão é igual à dissipação de energia mecânica por unidade de volume no gás que se esco.

A pressão estática na secção transversal de entrada é distribuída uniformemente, uma

vez que não há movimento giratório. Logo a tomada de pressão na entrada pode ser facilmente medida na parede. Em contrapartida, a pressão estática na saída do *overflow* é bem diferente daquela medida na seção transversal à parede de saída, em função do forte escoamento giratório. Na saída, o fluxo giratório ganha pressão dinâmica que pode ser significativa dificultando assim a determinação da pressão estática (CHEN; SHI, 2007).

A presença de sólidos no ciclone provoca uma redução na perda de carga, mesmo em concentrações muito baixas. Esta diminuição está relacionada ao aumento do atrito na parede, devido à aderência de algumas partículas à elas, o que causa uma diminuição da intensidade do vórtice e conseqüentemente uma diminuição das perdas associadas à formação do vórtice e à entrada do *vortex finder* (YUU et al., 1978; HOFFMANN; STEIN, 2002).

2.4 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A dinâmica de fluidos computacional, em inglês CFD *Computational Fluid Dynamics* (CFD), é uma sub-área da Computação Científica que trata dos estudos de métodos computacionais para modelagem de fenômenos físicos envolvendo o escoamento de fluidos.

Ao longo dos anos, graças aos recentes avanços no desenvolvimento de tecnologias da computação, a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) tem se tornado muito útil para para uma melhor compreensão e otimização de processos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

CFD lida com a solução de um conjunto de equações de dinâmicas de fluidos, por meio da utilização de computadores. CFD exige, relativamente, poucas hipóteses restritivas; e ao mesmo tempo, apresenta uma descrição completa dos campos de escoamento para diversas variáveis. configurações complexas podem ser tratadas por métodos relativamente simples e fáceis de aplicar, de modo que seja possível incorporar uma grande variedade de processos simultaneamente.

As simulações em CFD atuam como uma ponte entre a teoria e a realidade. Estas visam suprimir a grande lacuna que existe em algumas áreas do conhecimento. A técnica numérica apresenta a vantagem de oferecer um diagnóstico sobre o problema, antes mesmo de alterar qualquer condição operacional; de modo que o campo de escoamento, detalhadamente previsto, possa apresenta informações precisas sobre o comportamento do fluido, em condições que muitas vez não seria obtidas experimentalmente. Entretanto, as vantagens de se utilizar CFD estão condicionadas à solução precisa das equações de dinâmica dos fluidos, o que para a maioria dos escoamentos de interesse em engenharia

(Ciclones), são complexas. Em muitos casos, equívocos podem surgir em diferentes etapas do processo de simulação numéricas:

- na modelagem das equações dinâmicas de fluidos;
- nos dados de entrada e condições de contorno;
- nos métodos numéricos e convergência;
- nas restrições computacionais;
- na interpretação dos resultados, dentre outros.

Conforme o objetivo da simulação e precisão dos dados obtidos, um engenheiro pode melhorar suas análises e projetos, simulando condições extremas onde o custo e dificuldade da experimentação prática seria inviável. Os dados obtidos através da simulação numérica numérica devem ser, evidentemente, confiáveis para que possam ser aplicados. Entretanto, os desvios da solução correta subdividem-se em duas classes:

- Erros puramente numéricos, oriundos de uma solução errada obtida mesmo a partir do correto modelamento matemático. Neste caso, os aspectos de precisão numérica da máquina envolvida, e restrições de convergência dos métodos e algoritmos aplicados, podem ser os causadores.
- Erros da modelagem matemática, no qual as equações aplicadas ao problema não modelam bem, fisicamente, o fenômeno que ocorre.

As seções e subseções subsequentes tratarão de temas importantes para a modelagem matemática para os problemas de interesse nesta tese: ciclone filtrante.

2.4.1 Métodos de Discretização

A discretização consiste em dividir o domínio de cálculo em um certo número de subdomínios. O método de discretização é uma forma de se aproximar Equações diferenciais parciais em Equações algébricas, por meio de um conjunto de pontos discretos no espaço e no tempo. Na literatura é apresentada uma variedade de métodos de discretização, entretanto, os métodos mais utilizados são: Diferenças Finitas (MDF), Elementos Finitos (MEF) e Volumes Finitos (MVF). Todos os métodos citados tendem a gerar a mesma solução, desde que a malha proposta para solução apresente um grau de refino elevado. No entanto, alguns métodos são mais apropriados que outros, de acordo com o tipo de aplicação. Neste trabalho somente o método dos volumes finitos é considerado.

Método de Volumes Finitos

As Equações discretizadas são obtidas por meio da integração das equações de conservação para a propriedade de transporte ao longo de um volume de controle finito (VC). Nesta seção, aspectos gerais do método são discutidos brevemente, usando-se uma equação de conservação genérica para grandeza de conservação ϕ . Uma descrição mais detalhada sobre o método pode ser encontrada no livro de Patankar (1980).

O método de volumes finitos é uma abordagem numérica que pode ser utilizada para resolver problemas diversos de engenharia, envolvendo Equações diferenciais parciais (EDP). O método de volumes finitos baseia-se na discretização do domínio, semelhante ao que é proposto pelos métodos de diferenças finitas e elementos finitos, diferenciando somente quanto à forma de obtenção da solução aproximada das equações diferenciais (PINTO; LAGE, 1997).

Conforme Patankar (1980), a ideia principal da formulação por volumes finitos é de fácil entendimento e apresenta uma interpretação física direta. Neste método, o domínio de cálculo é dividido em um certo número de volumes de controle (VC) que não se sobrepõem, onde cada um destes volumes apresentam internamente um ponto nodal. No centroide de cada VC, localiza-se um nó computacional, onde são calculados os valores das variáveis; sendo os valores das variáveis nas superfícies dos VC obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centroide do VC). As integrais de volume e de superfície são aproximadas usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado final é uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em função de nós vizinhos.

Em geral, as equações de conservação apresentam termos que representam: o acúmulo, o transporte convectivo, o transporte difusivo e a geração de uma dada grandeza, conforme Equação 2.27. O primeiro termo do membro esquerdo é o termo de acúmulo, enquanto que o outro termo deste mesmo lado da equação é o fator associado ao transporte por convecção. No membro direito da Equação 2.27, o primeiro termo corresponde ao transporte difusivo, sendo o último o termo fonte ou de geração (PINTO; LAGE, 1997).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho v\phi) = \nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi) + S \quad (2.27)$$

Na Equação 2.27, ϕ é a grandeza conservada, Γ é a difusividade desta grandeza e S é o termo de geração.

Como frisado anteriormente, a aproximação discreta de uma equação de conservação, pelo método dos volumes finitos, tem por objetivo dividir o domínio de cálculo em um

número finito de subdomínios, nos quais a lei física de conservação tenha validade para uma determinada aproximação. Esta aproximação pode ser obtida de duas formas: a primeira forma é a utilização do balanço da propriedade conservada ϕ , para cada um dos subdomínios; o segundo modo é a integração da equação de conservação (Equação 2.27) no volume do subdomínio. Evidentemente, ambos os métodos chegam ao mesmo resultado, pois a equação de conservação se originou através de um balanço da propriedade de conservação em um volume finito (PINTO; LAGE, 1997).

O MVF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas. O método, como afirmado anteriormente, é inerentemente conservativo, contando que os integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) sejam os mesmos em faces partilhadas por VC. A aproximação com o MVF é talvez a de compreensão mais simples, pois todos os termos que precisam de ser aproximados têm significado físico, razão pela qual é popular entre engenheiros.

A desvantagem do MVF em relação ao MDF é o fato de métodos de ordem superior à segunda ordem serem mais difíceis de desenvolver em 3D, com malhas não estruturadas. Isto é devido ao fato da aproximação por VF requerer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciabilidade e integração (MALISKA, 2000).

2.4.2 Malhas Numéricas

É uma representação numérica da discretização, do domínio geométrico, no qual o problema será resolvido. Os pontos onde as variáveis são calculados são definidos pela malha numérica, que divide o domínio da solução num número finito de sub-domínios (elementos, volumes de controle, etc.). Os tipos de malhas podem ser agrupados do seguinte modo:

$$\text{Malhas} \begin{cases} \text{Ortogonalis} \rightarrow \text{Estruturadas} \\ \text{Não ortogonalis} \rightarrow \begin{cases} \text{Estruturadas} \\ \text{Não estruturadas} \end{cases} \end{cases}$$

Malhas Ortogonais e Malhas Não Ortogonais

Os métodos de reologia computacional baseados em sistemas de coordenadas ortogonais (ou Cartesianos) ou cilíndricos apresentam diversas limitações em geometrias, quando se trata de problemas que envolvem irregulares. Uma boa referência sobre geração de malhas podem ser encontradas em Maliska (2000).

Malhas Estruturadas e Malhas Não Estruturadas

Malhas estruturadas são malhas que, ao considerar apenas os aspectos geométricos, representam volumes de controles para os quais a discretização segue um sistema global de coordenadas, devido cada volume interno apresentar uma lei de construção: volumes sempre com o mesmo número de vizinhos. Uma malha estruturada possui volumes ordenados, de modo que, após o processo de integração e utilização de um esquema de interpolação, resultará numa matriz de coeficientes dos tipo diagonal (MALISKA, 2000). Portanto, devido as malhas estruturadas permitirem fácil ordenação, isso permite uma solução mais fácil e mais eficiente do problema. A Figura 2.7 apresenta o esquema de uma malha bidimensional estruturada.

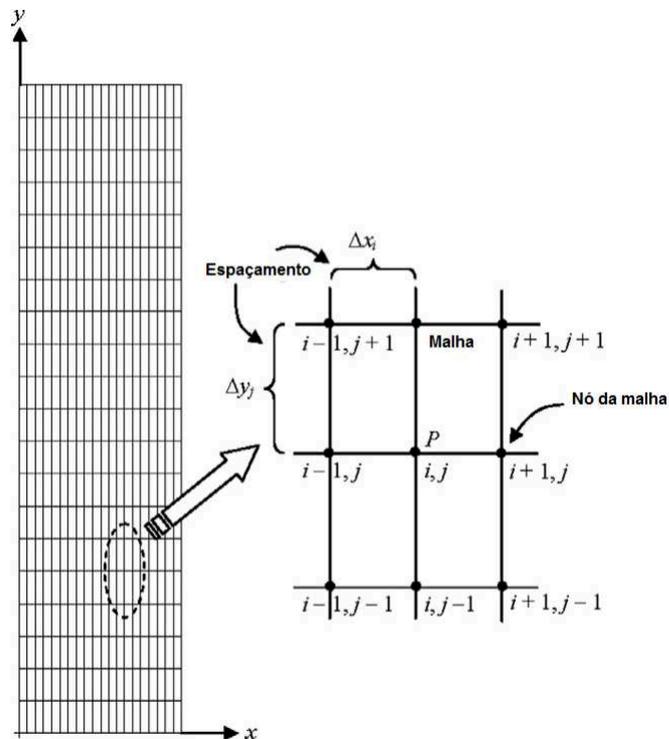


Figura 2.7: Malha estruturada (TU et al., 2007).

De modo geral, os problemas reais apresentam grandes dificuldades quanto à complexidade da geometria, impossibilitando, em muitos casos, a utilização de malhas estruturadas. Para estas situações, lançam-se mão de malhas não estruturadas, conforme Figura 2.8, por estas serem mais versáteis, com maior facilidade à adaptatividade e extremamente mais aptas para discretizar geometrias irregulares: com cantos e saliências. Entretanto, diferentemente do tipo estruturada, este tipo de malha encontra dificuldades quanto à ordenação, o que conseqüentemente dará origem a matrizes não diagonais. Portanto, a dificuldade de ordenação, dará origem a matrizes mais complexas (bandas largas), que impossibilitam a aplicação de muitos métodos de solução de sistemas lineares (MALISKA,

2000).

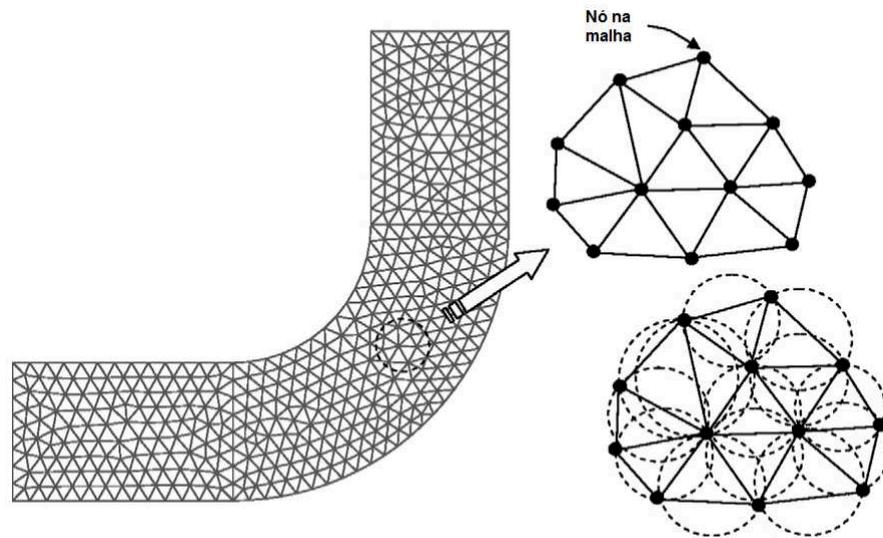


Figura 2.8: Malha não estruturada (TU et al., 2007).

Dado ao exposto, cabe salientar, que cada um dos tipos de discretização apresenta vantagens e desvantagens. Logo a escolha do método dependerá da natureza do problema. Uma boa referência sobre tipos de malhas é o livro de Patankar (1980).

2.4.3 Esquemas de Interpolação

Na literatura existe uma grande quantidade de trabalhos que abordam conceitos importantes sobre esquemas de interpolação tradicionais e esquemas numéricos de alta ordem para a interpolação: usados para definir as variáveis nas faces a partir de valores nos centros dos volumes de controles. Dentre algumas das referências mais utilizadas podem citar: Patankar (1980), Maliska (2000) e Versteeg e Malalasekera (2007).

Todos os esquemas numéricos devem apresentar as seguintes propriedades: conservação, delimitação e transporte. Quanto à conservação, sempre a conservação global da propriedade fluido ϕ deve ser assegurada. Quanto à delimitação, o domínio de cálculo deve ser delimitado, ou seja, os valores previstos pelo sistema devem estar dentro de limites realistas. Para problemas lineares, sem fontes ou geração, esses seriam os valores máximos e mínimos das condições de contorno. Mas, como o escoamento de fluidos é não linear, em muitos casos, os valores no domínio podem estar fora da faixa de valores de contorno. Quanto ao transporte, difusão ocorre em todas as direções; mas convecção ocorre somente na direção do fluxo. O esquema numérico deve identificar o sentido do escoamento, uma vez que este afeta as correntes de convecção contra difusão.

Esta seção tem como objetivo, apresentar diferentes esquemas numéricos computacionais, utilizados em CFD. Estes esquemas se diferenciam, não somente quanto à forma de discretização, para aproximar o sistema de Equações diferenciais, em um sistema de Equações algébricas, mas também quanto ao modelo de turbulência adotado, que serão discutidos em seções posteriores.

Esquema *First-Order Upwind*

Este é o esquema numérico de interpolação mais simples. Neste esquema, conforme apresentado na Figura 2.9, assume-se que o valor da variável transporte da face seja o mesmo valor estabelecido no nó anterior, ou seja, o valor da face é igual ao valor estabelecido no centro do volume de controle anterior à face. As principais vantagens do esquema de interpolação de primeira ordem *upwind* (UDS) é o fato de ser de fácil implementação e o resultado é bastante estável. Em contra partida, é um esquema que apresenta difusão numérica, de modo que os gradientes no campo de escoamento tendem a ser não muito precisos. Este esquema é muitas vezes utilizados para iniciar os cálculos (MALISKA, 2000).

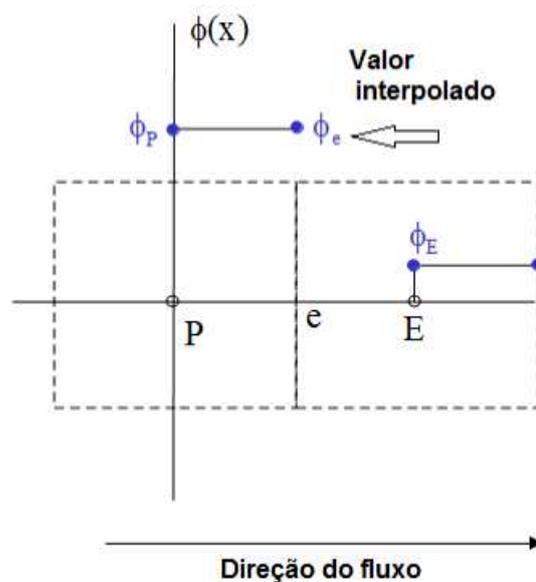


Figura 2.9: Esquema de interpolação: primeira ordem *upwind*.

Esquema *Central Differencing Scheme*

Pelo esquema *Central differencing scheme* ou diferenças centrais (CDS), determina-se o valor de ϕ na face, por meio de uma interpolação linear de valores presentes nos centros de dois volumes de controles, sendo um anterior e outro posterior à face, conforme

Figura 2.4.3. Este esquema é mais preciso que o de primeira ordem, visto na seção anterior, uma vez que apresenta um pequeno erro de truncamento, devido utilizar apenas dois pontos nodais. Entretanto, o uso de CDS na aproximação de termos advectivos propicia, na maioria das vezes, a geração de matrizes com coeficientes negativos, pois a viabilidade do CDS é para $Pe \leq 2$; o que é praticamente impossível, em problemas reais, garantir um refino de toda a malha que adeque a tal especificação (MALISKA, 2000). Portanto, o esquema de diferenças centrais conduz a oscilações ou divergência na solução, caso o número de Peclet (Pe) local seja maior do que 2.

Sendo o número de Peclet a relação entre os fatores convectivo e difusivo de transporte, $Pe = \frac{\rho v L}{\Gamma}$, é comum, em muitos casos optar, para as células com $Pe > 2$, pela utilização do esquema de primeira ordem *upwind*. Este tipo de esquema é denominado de esquema híbrido (MALISKA, 2000).

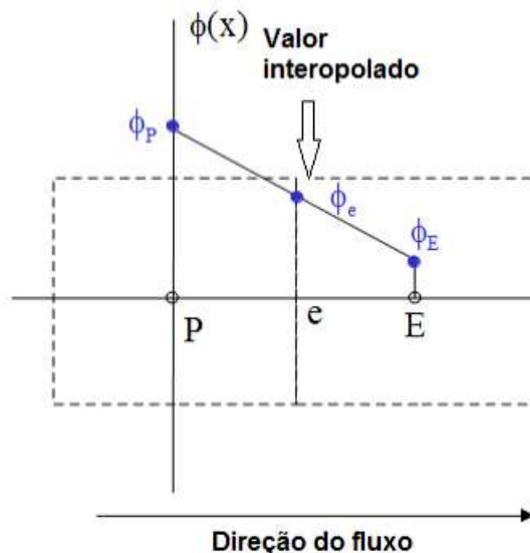


Figura 2.10: Esquema de interpolação: diferenças centrais

Esquema *Power-law*

Este esquema baseia-se na solução analítica da equação de advecção/difusão unidimensional. O valor da face é determinado por meio de um ajuste exponencial através dos valores das células. A aproximação do perfil exponencial é apresentado na Equação 2.28 de *Power Law*, conforme Figura 2.11. Para os casos onde $Pe > 10$, a difusão é insignificante, logo recomenda-se um esquema de primeira ordem *upwind*.

$$\phi_e = \phi_P - \frac{(1 - 0,1Pe)^5}{Pe}(\phi_e - \phi_P) \quad (2.28)$$

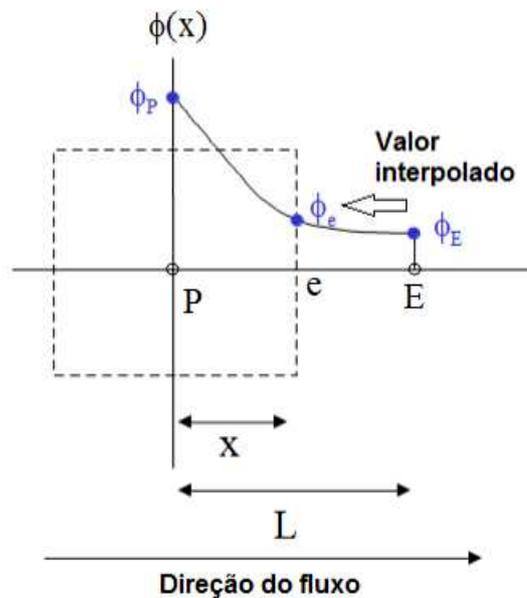


Figura 2.11: Esquema de interpolação: *Power Law*.

Esquema *Second-Order Upwind*

Neste esquema, determina-se o valor da face, ϕ , a partir dos valores nos centros de duas células anteriores à face, conforme Figura 2.12; onde uma precisão de ordem elevada é obtida via uma expansão em série de Taylor a partir dos valores no centroide das células. O esquema de segunda ordem *upwind* é mais preciso do que o de primeira ordem *upwind*. Entretanto, para regiões com elevados gradientes, pode resultar em valores que estão fora da faixa de valores da célula. Portanto, é necessário a aplicação de funções de paredes específicas para os valores nominais previstos. Este esquema é um dos mais populares esquemas numéricos, pois associa precisão e estabilidade num só esquema (MALISKA, 2000).

Esquema *Quick-Quadratic Upwind for Convective Kinematics*

A função de interpolação *Quick-Quadratic Upwind for Convective Kinematics* (QUICK) é bastante difundida, sendo uma opção em alguns pacotes comerciais de dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Neste esquema, uma curva quadrática é construída através de três nós: dois anteriores à face e um posterior, conforme apresentado na Figura 2.13. O esquema QUICK é muito preciso, mas em zonas com elevados gradientes, os resultados podem ser subestimados ou superestimados, o que pode resultar em problemas de estabilidade no cálculo. O esquema QUICK normalmente será mais preciso em malhas estruturadas alinhadas com a direção do escoamento (ANSYS, 2011).

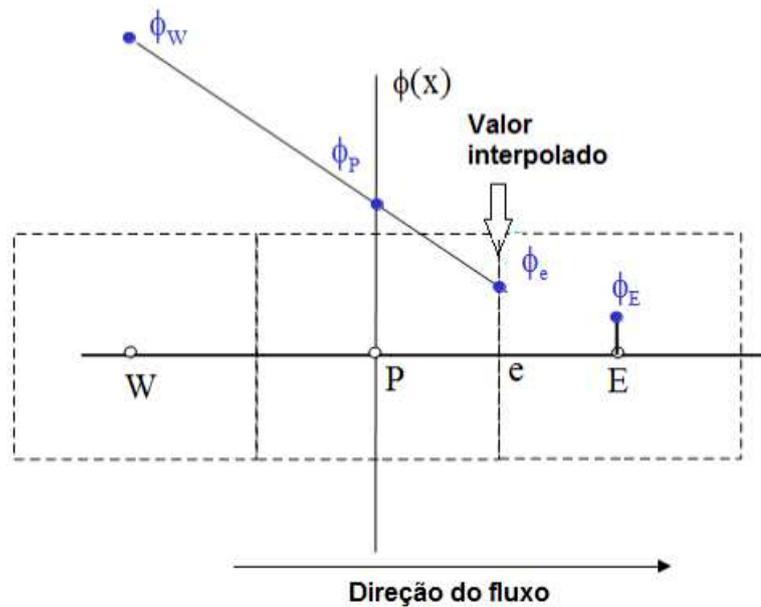


Figura 2.12: Esquema de interpolação: segunda ordem *upwind*.

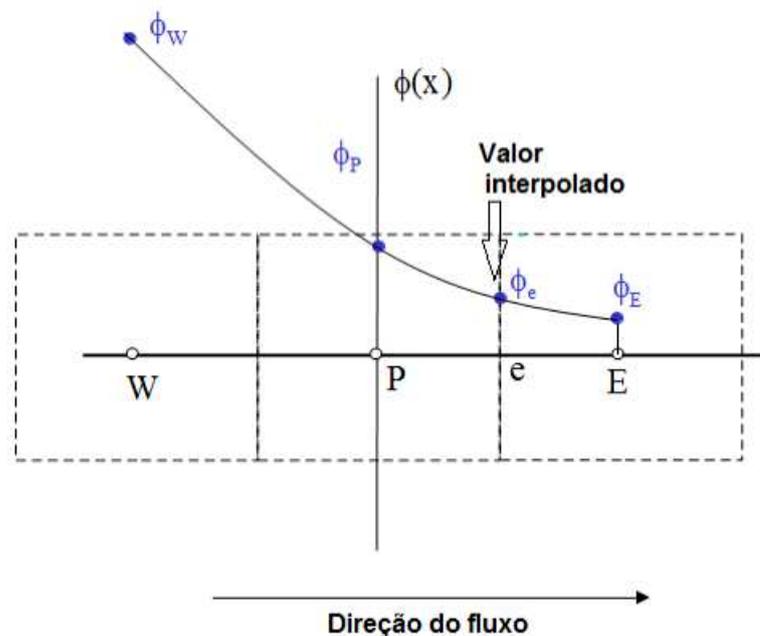


Figura 2.13: Esquema de interpolação: *Quadratic Upstream Interpolation Convective Kinetics (QUICK)*.

2.4.4 Resolução de Sistemas de Equações Algébricas

Vários métodos de discretização das equações diferenciais parciais foram apresentados na seção 2.4.1. Através deste processo, obtém-se um sistema de equações algébricas que precisam ser resolvidos por alguns métodos numéricos. A complexidade e tamanho deste

conjunto de equações dependem da dimensão e da geometria do problema físico. Se as equações são lineares ou não lineares interferirá na necessidade de métodos numéricos mais eficientes e robustos para resolver o sistema (TU et al., 2007).

Ao analisar um problema numérico, independentemente de sua dimensão, a discretização das equações resulta-se num sistema linear, que pode ser escrito na forma matricial. As matrizes obtidas caracterizam-se por possuírem um alto índice de esparsidade. A resolução do sistema de Equações pode ser obtida através de dois procedimentos: de forma direta ou de forma iterativa.

Os métodos diretos utilizam procedimentos que se baseiam em eliminação algébrica para obter a solução a solução exata em um número fixo de operações. Entre estes métodos pode-se elencar: a eliminação Gaussiana, a eliminação de Gauss-Jordan, a inversão matricial, a decomposição LU e o algoritmo de Thomas (PINTO; LAGE, 1997).

Os métodos iterativos levam a uma solução aproximada para o sistema de equações utilizando um procedimento iterativo a partir de uma solução aproximada inicial (*chute*). O quanto a variável se aproxima da solução exata é determinado pelo número de iterações, tendo como principais representantes os métodos de Jacobi e de Gauss-Seidel (TU et al., 2007).

O FLUENT utiliza um método conhecido como fatorização *multigrid* LU incompleta acelerada (*Multigrid accelerated Incomplete Lower Upper factorization, ou MG ILU*), conforme descrito por Hutchinson e Raithby (1986). Um estudo mais detalhado sobre métodos iterativos para solução de sistemas lineares podem ser encontrados em: Maliska (2000); Pinto e Lage (1997); Versteeg e Malalasekera (2007) e Fluent2011.

CFD baseia-se fundamentalmente nas equações que regem da dinâmica dos fluidos. As equações que regem os fenômenos representam afirmações matemáticas das leis físicas de conservação. O objetivo das seções subsequentes é apresentar a derivação e discussão de algumas destas equações.

2.4.5 Modelagem da Fase Gasosa

Todos os movimentos de fluidos, sejam eles laminar ou turbulento, são regidos por um conjunto de equações dinâmicas de conservação: *equação da continuidade*, a *equação do movimento* e a *equação da energia* (BIRD et al., 2007).

A Equação de Conservação de Massa

A equação de conservação de massa origina-se a partir um balanço material; em sua forma diferencial num volume de controle, a equação da continuidade pode ser representada pela Equação 2.29. A lei da continuidade afirma que, para escoamentos em regime transiente, de fluidos compressíveis e incompressível, o acúmulo de massa no elemento de fluido é igual à diferença de massa que entra e que sai no volume de controle (BIRD et al., 2007).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (2.29)$$

Na Equação 2.29, $v_i(\vec{x}, t)$ representa a componente i da velocidade do fluido em um ponto no espaço e no tempo e $\rho(\vec{x}, t)$ é a massa específica do fluido. Para fluidos incompressíveis, a massa específica (ρ) é constante e a lei da continuidade pode ser representada pela Equação 2.30:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.30)$$

A Equação de Conservação de Momento Linear

A equação de conservação do momento é resultado do balanço de forças de campo e de superfície no elemento de fluido (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A equação de momento, tomando como referência um ponto inercial fixo, é descrita por Batchelor (2000), podendo ser representada pela Equação 2.31:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2.31)$$

onde, $v_i(\vec{x}, t)$ representa a componente i da velocidade do fluido num ponto no espaço e no tempo; $p(\vec{x}, t)$ a pressão estática; $\tau_{ij}(\vec{x}, t)$ é o tensor de viscoso de *Reynolds* e $\rho(\vec{x}, t)$ é a massa específica do fluido.

O tensor de *Reynolds* é dado pela Equação 2.32, sendo s_{ij} modelado pela Equação 2.33 .

$$\tau_{ij} = 2\mu(s_{ij} - \frac{1}{3}s_{kk}\delta_{ij}) \quad (2.32)$$

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.33)$$

O número de Mach associado ao escoamento em ciclones é bem nominal, o que valida a consideração de escoamento incompressível. Entretanto, sendo o ar um fluido newtoniano, a tensão viscosa está associada ao movimento do fluido incompressível, por meio da viscosidade (JAYARAJU, 2009). Sendo assim, a forma simplificada da equação de momento em escoamento incompressível pode ser representada pela Equação 2.34, denominada de equação de *Navier-Stokes*.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.34)$$

Diferentes metodologias para solução das equações de *Navier Stokes* são apresentadas na seção 2.4.6, onde serão apresentados diferentes modelos de turbulência.

Nesta tese, os efeitos da temperatura são ignorados e, portanto, a equação de energia é desacoplada das equações de continuidade e do movimento, portanto não fora apresentada.

2.4.6 Modelagem da Turbulência

Na mecânica dos fluidos, a turbulência é um regime de movimento de fluido caracterizado pela flutuação aleatória das variáveis no tempo e no espaço, de modo que valores médios estatisticamente distintos podem ser observados (HINZE, 1975).

A turbulência nos fluidos está entre os mais complexos e espetaculares fenômenos encontrados na natureza. É naturalmente tridimensional e dependente do tempo. É caracterizada por processos não lineares de troca de massa, energia e quantidade de movimento, o que se dá via interações entre estruturas das mais variadas escalas de tempo e de comprimento (SILVEIRA NETO, 2004).

A importância prática da compreensão da turbulência é muito grande e crescente nos dias atuais. A turbulência é estudada por diferentes áreas das ciências, cada uma com suas motivações particulares, geradas pela busca de compreender um dos mais espetaculares fenômenos naturais. Entre algumas referências importantes, onde maiores detalhes sobre turbulência podem ser encontrados, têm-se: Hinze (1975), Wilcox et al. (1998), Silveira Neto (2004) e Sodja (2007).

Os escoamentos no interior de separadores ciclônicos em geral são turbulentos, transiente e tridimensionais (DERKSEN et al., 2006). Desta forma, o conhecimento desse fenô-

meno é uma etapa importante na modelagem numérica de escoamentos em ciclones. Portanto, uma das maneiras de descrever o escoamento turbulento em ciclones é apresentar um termo que traduza o comportamento global desse escoamento, especificando o tamanho dos vórtices (ou turbilhões), que dependem essencialmente da velocidade média do escoamento e das características genéricas do sistema (HOFFMANN; STEIN, 2007).

A contínua transferência de energia dos turbilhões maiores, para os menores é denominado de cascata de energia. O tamanho dos turbilhões está intimamente ligado às escalas de turbulência, desde escalas maiores até as escalas menores, onde ocorrem as dissipações de energia. Os turbilhões maiores são dependentes das medidas de escoamento, sendo caracterizados a partir de características médias do escoamento. Assim, suas escalas turbulentas são grandes em comparação com os efeitos viscosos, fazendo com que a estrutura seja altamente anisotrópica. Os pequenos turbilhões, entretanto, apresentam escalas de turbulência muito menores, fazendo com que o escoamento seja isotrópico, uma vez que os efeitos viscosos são dominantes (TU et al., 2007). Quanto à descrição dos conceitos associados ao comprimento característico do escoamento e escala de turbulência, é uma abordagem um tanto complexa e foge do escopo da tese. Uma longa discussão sobre o assunto é apresentada por Wilcox et al. (1998) e Silveira Neto (2004).

As quatro principais abordagens numéricas utilizadas para resolver as Equações de *Navier-Stokes* são: Abordagem *direct numerical simulation* (DNS), abordagem *large eddy simulation* (LES), abordagem *detached eddy simulation* (DES) e a abordagem *reynolds averaged navier stokes* (RANS). Dentre todas as abordagens, a mais precisa é a DNS, onde toda a faixa de escalas espaciais e temporais de turbulência são resolvidas (HINZE, 1975). Entretanto, tal abordagem apresenta um custo computacional muito alto. Nesta tese, será dada ênfase às abordagens RANS e LES. Uma discussão mais elaborada sobre abordagens de diversos modelos de turbulências aplicados em CFD pode ser encontradas em Wilcox et al. (1998), Silveira Neto (2004) e Versteeg e Malalasekera (2007).

Quanto aos conceitos associados escalas de turbulência, o processo de decomposição das escalas deu origem a dois grupos de Equações:

- Equações médias de Reynolds (1884), para as quais as escalas da turbulência são separadas nas escalas relativas ao comportamento médio e nas escalas relativas às flutuações em relação a esta média;
- Equações de *Navier-Stokes* filtradas (Smagorinsky, 1963), para as quais as escalas da turbulência são separadas em dois grupos, ou seja, o grupo das grandes escalas e o grupo das pequenas escalas ou escalas sub-malha.

Equações Médias de Reynolds (RANS)

O escoamento turbulento em ciclones é tido como transiente, isotérmico e incompressível. Sendo assim, as Equações médias de Reynolds (RANS), para a conservação de massa e para as Equações de *Navier-Stokes*, podem ser obtidas a partir da decomposição em escalas de turbulência (com $u_i = \bar{u}_i + u'_i$) e da transformação das Equações 2.30 e 2.34 em Equações médias, via manipulação matemática. Portanto, como resultado final, têm-se as Equações 2.35 e 2.36, referentes às Equações da continuidade e de *Navier Stokes* médias para um escoamento incompressível.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right] \quad (2.36)$$

Uma observação importante na geração da equação de *Navier Stokes* média, é o surgimento do tensor médio de *Reynolds*. Na Equação 2.36, observa-se que o resultado imediato do processo de decomposição de escalas e das transformações das Equações originais em Equações médias, é o surgimento de um tensor adicional $\tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$, denominado tensor de *Reynolds*, que pode ser reescrito na forma matricial apresentada na Equação 2.37. Este tensor é simétrico ($\tau_{ij} = \tau_{ji}$) e apresenta natureza física semelhante ao tensor viscoso molecular, apesar de sua origem, ligada ao termo não linear (SILVEIRA NETO, 2004; TU et al., 2007).

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Como citado anteriormente, a abordagem via Equações médias de *Reynolds* requer menos recursos computacionais do que as abordagens LES ou DNS. Entretanto, por não resolver os fenômenos de escoamento em escala menores, a metodologia RANS apresenta problemas de fechamento das Equações de turbulência (SHUKLA et al., 2013).

Equações de Navier-Stokes Filtradas ou de Grandes Escalas

Nesta abordagem, um valor instantâneo de uma variável de transporte ($\phi(x, t)$) é decomposto num valor filtrado ($\bar{\phi}(x, t)$), e um componente flutuante ($\phi(x, t)'$), conforme

apresentado pela Equação 2.38.

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x, t) + \phi(x, t)' \quad (2.38)$$

As propriedades associadas ao processo de filtragem são diferentes daquelas resultantes do processo de média. O processo de filtragem pode ser definido a partir da integral de convolução envolvendo a função (ϕ) a ser filtrada, e uma função filtro apropriada (G), que pode ser uma função temporal ou espacial; como ilustra a Equação 2.39, para um filtro espacial.

$$\bar{\phi}(\bar{x}, t) = \int_V G(\bar{x} - \bar{x}') \phi(\bar{x}', t) d\bar{x}' \quad (2.39)$$

Nas Equações Filtradas, o tensor de *Reynolds* τ_{ij} , que modela a transferência de energia entre a banda resolvida (grandes escalas) e a banda não resolvida do espectro (pequenas escalas) é apresentado na Equação 2.41. O fechamento das Equações filtradas, semelhante ao fechamento em RANS, passa pelo desenvolvimento de modelos de turbulência que possam prever as tensões de *Reynolds* e os termos escalares de transporte, estabelecendo uma relação entre as tensões de *Reynolds* e o campo de velocidade média (SILVEIRA NETO, 2004).

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right] \quad (2.40)$$

onde τ_{ij} é apresentado pela Equação 2.41

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= +\overline{u'_i u'_j} + \overline{u'_i \bar{u}_j} + \overline{\bar{u}_i u'_j} + L_{ij} \\ L_{ij} &= \overline{\bar{u}_i \bar{u}_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \end{aligned} \quad (2.41)$$

Modelos de Turbulência

A maior parte dos problemas práticos de engenharia é caracterizada por números de *Reynolds* elevados, ou seja, sobre condições de turbulência. Sendo assim, a solução de muitos problemas perpassa pelo fechamento do modelo de turbulência. A modelagem da turbulência pode apresentar duas tendências: a modelagem estatística clássica, que é caracterizada pela simulação numérica que busca entender o comportamento médio dos escoamentos turbulentos e a modelagem sub-malha, que é a simulação numérica de

grandes escalas, onde as grandes estruturas turbilhonares são resolvidas explicitamente e as menores estruturas são modeladas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

O primeiro grupo, baseado na modelagem estatística clássica, pode ser subdivididos nos modelos a zero Equações de transporte, a uma equação, a duas e até a seis Equações adicionais de transporte. Já nos modelos contemporâneos, a simulação numérica de grandes escalas, tida com uma nova concepção de modelagem e de simulação: trata-se de modelagem sub-malha e da Simulação de Grandes Escalas (SGE). Aos modelos clássicos interessam-se pelo comportamento médio e por informações puramente estatísticas dos escoamentos turbulentos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A metodologia de turbulência com base na simulação em grandes escalas (SGE), como apresentado anteriormente, fundamenta-se nos conceitos inerentes a Equações filtradas no espaço. Com a metodologia de SGE, objetivam-se a obtenção de informações instantâneas assim como de informações estatísticas. Neste caso, é necessário a utilização de métodos teóricos para se compreender fisicamente a turbulência.(VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Os modelos clássicos de turbulência são baseados nos valores médios obtidos via equação de *Navier-Stokes* (RANS). Tais modelos são classificados conforme o número de Equações diferenciais parciais (PDE) adicionais que deverão ser resolvidas:

- **modelos com zero Equações:** Trata-se de toda uma família de modelos baseados na hipótese do comprimento de mistura de *Prandtl*;
- **modelos de uma equação:** modelo k-L onde k: energia cinética turbulenta, cujo cálculo passa pela solução de uma equação de transporte adicional e L: Comprimento característico, estimado para cada problema em análise;
- **modelos com duas Equações:** inclui os modelos k- ε (standard, RNG, de realização), modelos k- ω e modelo ASM;
- **modelo com Seis Equações:** modelo do tensor de Reynolds (RSM).

Os modelos de turbulência também podem ser classificados segundo a dependência ou não do conceito de viscosidade turbulenta. Este conceito foi proposto por *Boussinesq* em 1877, em que o tensor de reynolds pode ser reescrito, em notação tensorial, conforme a Equação 2.42, onde ν_t é a viscosidade turbulenta e k , apresentado na Equação 2.43, é a energia cinética turbulenta. Portanto, nesta abordagem, *Boussinesq* se propõe a fechar o sistema de Equações, modelando o tensor de Reynolds com o conceito de viscosidade

turbulenta.

$$\tau_{ij} = -\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2.42)$$

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{(u'_i u'_i)} = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (2.43)$$

O termo envolvendo o delta de Kronecker δ_{ij} , na Equação 2.42, surge devido à necessidade de compatibilizar a definição de k acima com a soma do traço do tensor de *Reynolds* modelado através da hipótese de Boussinesq (SILVEIRA NETO, 2004).

Ressalta-se que ν_t é uma propriedade do escoamento e não do fluido, como a viscosidade molecular. Esta característica implica na dificuldade maior de avaliação desta propriedade, uma vez que ela depende da natureza do próprio escoamento, constituindo-se numa forte não linearidade na solução das Equações. Trata-se de uma propriedade que depende do espaço e do tempo (WILCOX et al., 1998).

A energia cinética turbulenta (k) também aparece no modelo de fechamento proposto por Boussinesq. No entanto, como ela depende apenas do traço do tensor de Reynolds, ela tem uma natureza semelhante à pressão ao qual pode ser incorporada.

A seguir são apresentados, de maneira resumida, os conceitos e Equações que compõem alguns dos principais modelos de turbulência utilizados em engenharia, para modelar o tensor de *Reynolds*. Entretanto, alguns outros modelos são descritos em Versteeg e Malalasekera (2007).

Modelo $k - \varepsilon$

O modelo $k - \varepsilon$, como citado anteriormente, enquadra na classe dos modelos denominados de duas Equações. Este modelo é amplamente utilizado dada sua versatilidade e à possibilidade de representar uma ampla gama de fenômenos físicos a um baixo custo computacional.

Para este tipo de modelo, são empregadas duas variáveis: a energia cinética turbulenta (k) e a dissipação da energia cinética turbulenta (ε). A primeira representa a variância das flutuações de velocidades, enquanto a segunda quantifica a taxa na qual a dissipação de energia ocorre. O modelo $K - \epsilon$, contempla a hipótese de viscosidade turbulenta, de modo que a o modelo da viscosidade apresenta contribuições relativas a regimes laminares e turbulentos (SODJA, 2007).

As Equações que caracterizam este modelo, conforme apresentado por Wilcox et al. (1998), são as seguintes:

- Viscosidade turbulenta cinemática:

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.44)$$

- Energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = -\overline{u'_j u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (2.45)$$

- Taxa de dissipação específica:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \varepsilon) = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \quad (2.46)$$

- Relações complementares e constantes de fechamento:

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44; C_{\varepsilon 2} = 1,92; C_\mu = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad (2.47)$$

$$\omega = \frac{\varepsilon}{C_\mu k}; \ell = C_\mu k^{3/2} / \varepsilon \quad (2.48)$$

Os modelos de turbulência do tipo do $k - \varepsilon$, não representa muito bem o comportamento fluidodinâmico em ciclone, dada à característica anisotrópica do escoamento (CORTEZ; GIL, 2007; HOFFMANN; STEIN, 2007).

Modelo das Tensões de Reynolds (RSM)

Os modelos de turbulência de duas Equações, inclusive o $k - \varepsilon$, não são capazes de prever os comportamentos mais sutis inerente a escoamento anisotrópicos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Uma alternativa para escoamentos anisotrópicos, como no ciclone, é a utilização do modelo baseado nas tensões de *Reynolds* (RSM).

O modelo RSM não contempla a hipótese da viscosidade turbulenta de *Boussinesq*, como no modelo $k - \varepsilon$. O modelo RSM é um tipo de modelo muito mais versátil que o $k - \varepsilon$. Pois, a partir de um mesmo conjunto de constantes, o modelo é capaz de simular escoamentos mais diversificados, com boa confiabilidade. Entretanto, a robustez deste modelo vem acompanhada de um maior custo computacional (SILVEIRA NETO, 2004).

O modelo das tensões de Reynolds está fundamentado em deduzir diretamente as Equações de transporte para as tensões de Reynolds (WILCOX et al., 1998). Neste modelo, estão presentes as Equações da energia cinética turbulenta e da dissipação viscosa, que fazem parte de um conjunto seis Equações de transporte adicionais, para as componentes do tensor de Reynolds.

O modelo RSM é considerado o modelo de turbulência entre os RANS, o mais adequado para escoamentos em ciclone (WANG et al., 2006a). A origem do modelo RSM se baseia no trabalho de apresentado por Launder et al. (1975) ; de modo que a Equação 2.36, possa ser descrita para um fluido incompressível, conforme (SAFIKHANI et al., 2010):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij} \quad (2.49)$$

onde u_i é a velocidade média do fluido, x_i é a posição, \bar{p} é a pressão média, ρ é a massa específica constante do gás, ν a viscosidade cinemática turbulenta e $R_{ij} = \tau_{ij} = \overline{u'_i u'_j}$ é o tensor de Reynolds.

O modelo de turbulência RSM fornece Equações diferenciais de transporte para avaliação das componentes da tensão turbulenta Equação (Eq. 2.50).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} R_{ij} + \bar{u}_k \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} &= \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\nu_t}{\sigma^k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} \right) - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right] \\ - C_1 \frac{\varepsilon}{K} \left[R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} K \right] - C_2 \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \end{aligned} \quad (2.50)$$

onde, o termo produção de turbulência é definido como (Eq. 2.51). (SAFIKHANI et al., 2010):

$$P_{ij} = - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right]; P = \frac{1}{2} P_{ij} \quad (2.51)$$

Com P sendo a produção de energia cinética flutuante. ν_t é a viscosidade cinemática turbulenta; e $\sigma^k = 1$, $C_1 = 1,8$, $C_2 = 0,6$ são as constantes empíricas. A Equação de transporte para a taxa de dissipação de turbulência, conforme Launder et al. (1975), é :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma^\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C^{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C^{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (2.52)$$

Na Equação 2.52, $K = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i}$ é a energia cinética turbulenta e ε é a taxa de dissipação turbulenta. Os valores das constantes são $\sigma^\varepsilon = 1,3$, $C^{\varepsilon 1} = 1,44$ e $C^{\varepsilon 2} = 1,92$.

Nos parágrafos subsequentes, são apresentados algumas referências, da vasta literatura que aborda a utilização do modelo RSM, no estudo de ciclones.

Slack et al. (2000) avaliaram o modelo d RSM e o modelo de turbulência para simulação de grandes escalas (LES), para um ciclone com diâmetro de 205 milímetros. No trabalho, foi apresentado que, com uma malha relativamente grosseira, o modelo RSM apresentou boa concordância entre as medidas previstas e dados experimentais. Os autores salientaram que os resultados via o modelo LES são mais caros computacionalmente, mas ratificaram que a qualidade dos resultados poderia levar a um melhor desempenho na previsão de eficiência de separação. Entretanto, deixaram claro que o modelo RSM é um bom modelo para prever a dinâmica do escoamento em ciclones.

Os autores Dias (2009) e Elsayed e Lacor (2012), em particular, dentre muitos, utilizaram o modelo de turbulência das tensões de Reynolds (RSM), verificando que tal modelo pode descrever, com precisão, os campos de escoamentos em ciclones; associado à abordagem lagrangiana, o modelo pode rastrear a trajetória das partículas no interior de ciclones. Entretanto, Shukla et al. (2013), verificou que o modelo RSM, mesmo apresentado bom desempenho em prever adequadamente os campos de escoamento em ciclones, o modelo não foi capaz de prever precisamente as flutuações de velocidade e eficiência de coleta, especialmente para pequenas partículas. O autor ainda afirma que o PVC é identificado com maior precisão pelo modo LES que pelo modelo RSM.

Modelo LES

A técnica de simulação em grandes escalas, em inglês *Large eddy simulation* (LES), baseia-se na teoria de auto-similaridade desenvolvida por *Kolmogorov*, em que as grandes escalas de turbulência do escoamento são dependentes da geometria, enquanto as escalas menores são mais universais (JAYARAJU, 2009). Assim, os grandes turbilhões tridimensionais, regidos pelas condições de geometrias e de contorno do escoamento, são calculados diretamente (resolvido); enquanto que as escalas menores, sendo mais isotrópicas, são modelados, como ilustra a Figura 2.14.

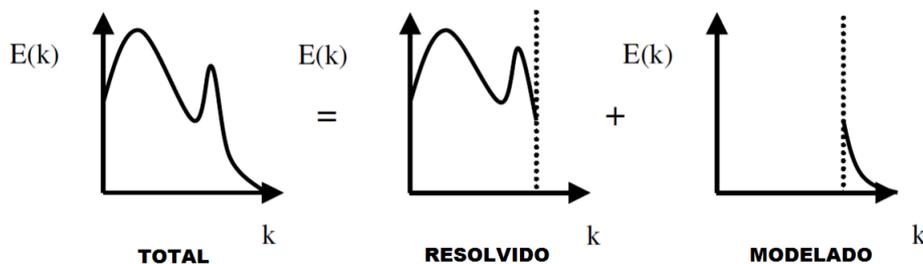


Figura 2.14: A decomposição do espectro de energia (SHALABY, 2007).

Uma boa referência para aplicação de LES em ciclones é o trabalho desenvolvido por Derksen (2003). No estudo a eficiência de um ciclone *Stairmand* de alta eficiência foi

avaliado através de ferramentas computacionais de CFD. Para isto foi usado o modelo LES (Large-Eddy Simulations) para a turbulência. O trabalho foi validado baseando-se nos dados experimentais obtidos por Hoekstra et al. (1999), mostrando que esta metodologia numérica de simulação poderia obter resultados satisfatórios.

A técnica de simulação em grandes escalas é mais precisa na descrição do comportamento de escoamento turbulento onde existem maiores espectros de energia, em detrimento aos de menores escalas, conforme ilustrado na Figura 2.15. A técnica LES baseia-se na separação entre grandes e pequenas escalas. o tamanho da malha deve ser determinado primeiramente, de modo que as escalas que apresentam tamanhos característicos maiores que da malha são chamados de grandes ou escalas resolvidas, enquanto outros são chamados de escalas pequenas ou sub-malha. As escalas pequenas são contempladas através de modelos denominados de sub-malha (SHALABY, 2007). Estudos mais detalhados sobre a modelagem LES podem ser encontrados em diversas referências, como: Wilcox et al. (1998) e Pope (2000).

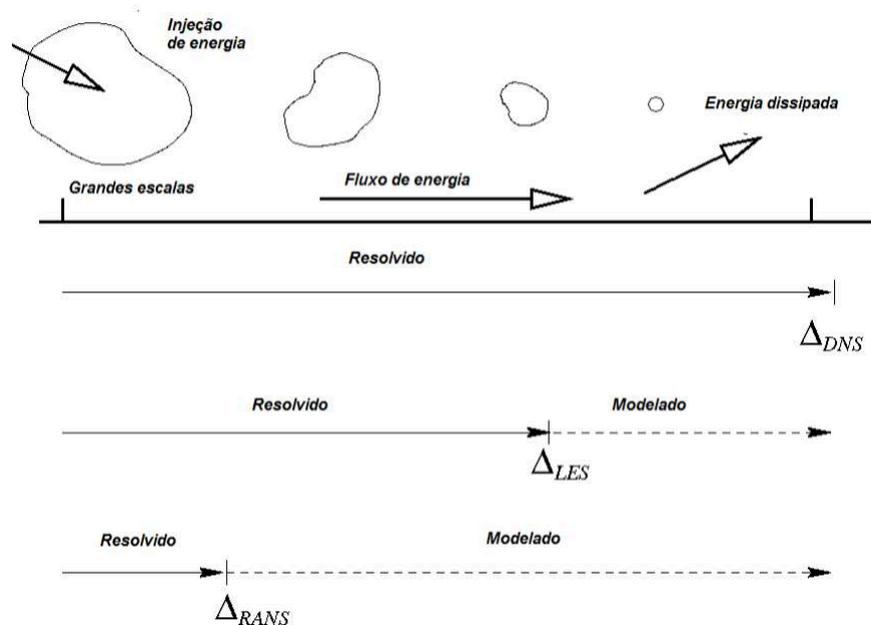


Figura 2.15: Cascata de energia (SHALABY, 2007).

A metodologia de Simulação de Grandes Escalas se posiciona de forma intermediária entre os modelos RSM e DNS, viabilizando a simulação da natureza física de escoamentos turbulentos, mesmo a altos números de Reynolds, conforme pode ser observado na Figura 2.14 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

2.4.7 Metodologia CFD

Na seções anteriores foram apresentados, de maneira bem sucinta, algumas Equações diferenciais, que associadas a uma forte base teórica, constitui toda a fundamentação para a modelagem matemática em ciclones. Entretanto, devido o conjunto de Equações diferenciais apresentado não ter uma solução analítica, há a necessidade de se utilizar um método numérico como uma ferramenta de cálculo. A aplicação de um método numérico na solução não é uma situação trivial, requer muita expertise e conhecimento, principalmente quando se trata de geometrias complexas, como o ciclone filtrante apresentado nesta tese.

O Código Computacional FLUENT

Nesta tese, como *software* numérico, foi utilizado um pacote computacional comercial, FLUENT distribuído pela ANSY Inc. O FLUENT 14.0 é um código comercial para a modelagem de escoamentos de fluido, transferência de calor e reação química. O FLUENT pode modelar uma ampla gama de fenômenos físicos, incluindo: geometrias 2D / 3D em coordenadas cartesianas, cilíndricas ou coordenadas curvilíneas gerais; escoamentos em estados estacionário ou transiente; escoamentos incompressível ou compressível; escoamentos laminar ou turbulento; transferências de calor por condução, convecção e radiação e escoamento através de meios porosos (FLUENT, 2011).

Através do FLUENT, é permitido modelar uma grande variedade de fenômenos, resolvendo as equações de conservação de massa, momento, energia e espécie químicas, utilizando o método de volumes finitos. As equações de transporte são discretizadas em cada volume finito ou malha. Um sistema não escalonado é usado para o armazenamento dos valores discretos de velocidades e pressões. A interpolação pode ser realizada através de esquemas de primeira ordem, *Power-Law* ou, opcionalmente, via esquemas de ordem superior, frisados na seção 2.4.3. Em ciclones, as equações discretizadas são resolvidas usando o algoritmo SIMPLEC, de forma iterativa e aceleração *multigrid*. Uma compreensão básica das técnicas acima listadas é determinante para realização das simulações (MALISKA, 2000).

Os códigos computacionais com CFD baseiam-se em algoritmos numéricos que lidam com escoamento de fluidos. A fim de facilitar o acesso, muitos softwares comerciais proporcionam sofisticadas interfaces ao usuário, possibilitando fácil entrada de dados e análise de resultados. Portanto, todos os códigos apresentam as seguintes partes como elementos principais em CFD:

- um pré-processador;

- um solucionador (*solver*);
- um pós-processador;

A Figura 2.16 apresenta um quadro que ilustra a interligação dos três elementos Principais, acima mencionados, em uma análise via Análise CFD.

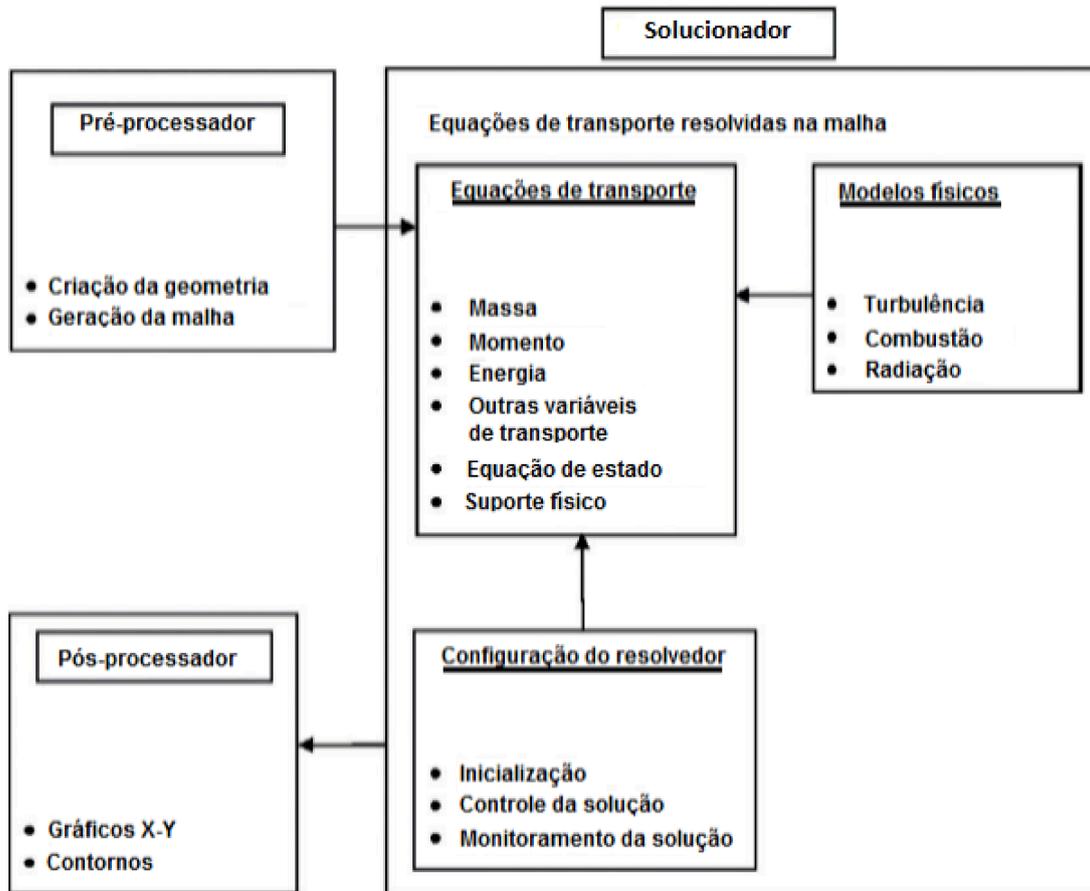


Figura 2.16: Interligação dos três elementos principais em CFD (TU et al., 2007).

Etapa de Pré-processamento

A etapa de pré-processamento consiste na definição inicial do volume de controle e das condições de entrada. Nesta etapa é criada a geometria do domínio de cálculo a ser considerado, por meio de uma interface de fácil acesso, que preparará o problema em uma forma apropriada para utilização em um posterior programa solucionador (*solver*). As etapas de pré-processamento envolvem:

- definição da geometria de interesse;

- criação da malha;
- definição das propriedades dos fluidos;
- criação das regiões de escoamento e definição das condições de contorno;

A fim de melhorar a produtividade, os principais códigos comerciais incluem interfaces próprias que possibilitam importar dados dos geradores de geometrias e malhas para o processador. No desenvolvimento desta tese, para etapa de geração de geometrias e malhas, foi utilizado o GAMBIT versão 2,3.16.

Cabe salientar que esta é uma das etapas primordiais, uma vez que a elaboração de uma malha complexa, caso do ciclone filtrante, requer uma certa experiência. Maiores detalhes podem ser observados em GAMBIT (2004).

Nesta etapa também se estabelece várias considerações em relação à solução numérica. A definição das propriedades dos fluidos é executado no FLUENT, que a carrega a malha exportada do GAMBIT, onde já foram definidas todas as condições de contorno, podendo estas serem alteradas no FLUENT, se necessário. No FLUENT, realiza-se as seguintes definições:

- fluidos e sólidos existentes no domínio, com suas respectivas propriedades;
- modelos matemáticos a serem empregados;
- condições de contorno;
- parâmetros de cálculo;
- variáveis e funções extras, definidas pelo usuário;
- frequência dos arquivos de backup e de resultados intermediários.

Ao final desta etapa, um arquivo com definições e informações necessárias em etapas posteriores, para solução do problema foi criado.

Processamento (*Solver*)

Nesta etapa é onde a solução numérica é executada de fato. Devido a solução ser executada por método iterativo, o acompanhamento dos resultados podem ser feitos a todo momento, permitindo a qualquer momento as análises quando às condições da simulação, conforme ilustra a Figura 2.16.

Em linhas gerais, o algoritmo numérico solucionador contempla as seguintes etapas:

- integração das equações que regem o escoamento ao longo de todo o volume de controle;
- discretização: conversão das Equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas;
- solução das equações algébricas por um método iterativo.

No método de solução por volumes finitos, abordado nesta tese, pode usar os métodos de solução segregado ou acoplado. Para isso, utiliza-se alguns métodos específicos de discretização, associados a um o método iterativo de solução do sistema de Equações.

Método Segregado

Com métodos segregados, uma equação referente a uma determinada variável é resolvida para todas as células, e somente depois, a equação vai para a próxima variável que é resolvida para todas as células. O método de solução segregado é o método padrão na maioria dos códigos de volumes finitos comerciais, como o FLUENT. Este método é mais adequado para escoamentos incompressíveis ou escoamentos compressíveis em baixos números de Mach (FLUENT, 2011). O procedimento para o método de solução segregada é apresentado na Figura 2.17.

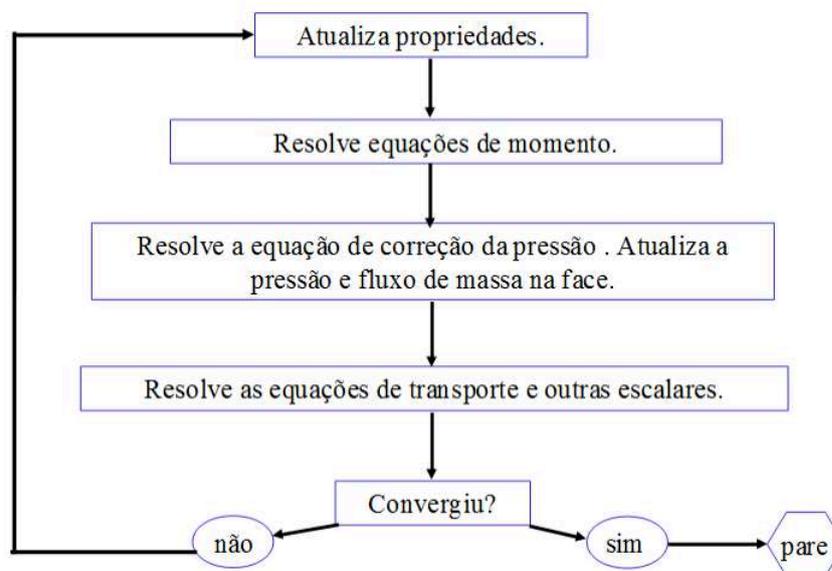


Figura 2.17: Procedimento do Método Segregado(FLUENT, 2011).

Método Acoplado

Para métodos acoplados, em uma dada célula, todas as equações das variáveis são resolvidas simultaneamente, e este processo é repetido para todas as células. Escoamentos compressíveis, em elevados número de Mach, especialmente quando envolvem ondas de choque, são resolvidos de forma mais precisa pelo método acoplado (FLUENT, 2011). O procedimento para o método de solução acoplado é apresentado na Figura 2.18.

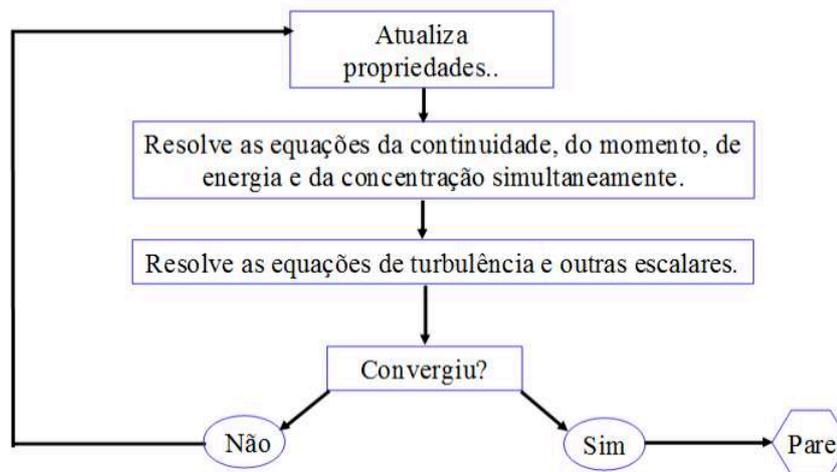


Figura 2.18: Procedimento do método acoplado(FLUENT, 2011).

Em simulações transientes, tanto para o método segregado quanto para o acoplado, deve-se especificar o passo de variação do escoamento com tempo (*passo de tempo*). Caso seja necessário uma solução mais precisa com o tempo, a solução deve convergir a cada *passo de tempo*. Caso contrário, a convergência, a cada passo de tempo não é necessário. Uma boa discussão a respeito da definição do (*passo de tempo*) é apresentada por Elsayed (2011).

Para estes casos citados no paragrafo anterior, o procedimento de calculo é apresentado na Figura 2.19.

Ao final de todos estes processos, quando se atinge a convergência, o *solver* do FLUENT cria um arquivo de resposta a ser utilizado na próxima etapa, o pós-processamento.

Pós-processamento

Semelhante à etapa de pré-processamento, um grande avanço tem ocorrido no campo do pós-processamento. Com o aumento do poder computacional aliado à excelente capacidade gráfica dos computadores recentes, os pacotes de CFD são equipados com ferramentas versáteis de visualizações, que possibilitam análise precisas dos resultados.

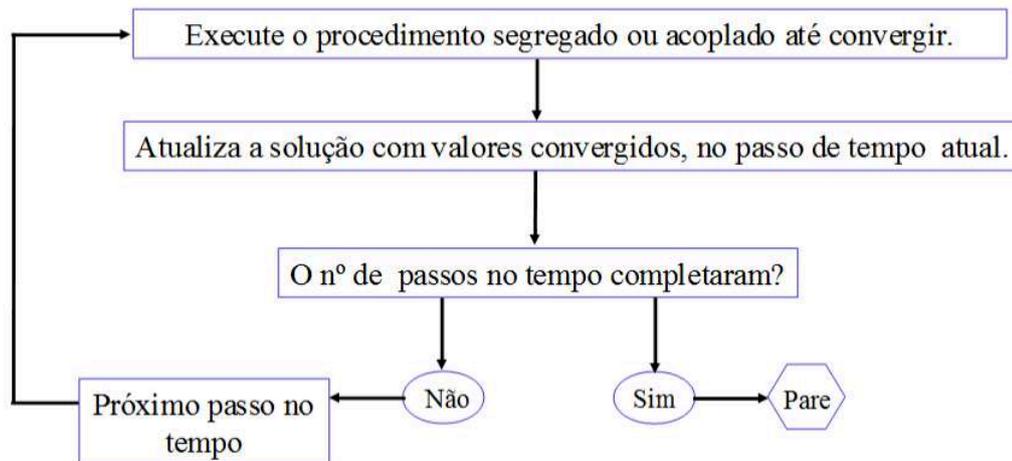


Figura 2.19: Procedimento do método transiente (FLUENT, 2011).

Esta etapa incluem:

- gráficos vetoriais.
- gráficos de contorno.
- gráficos de superfície.
- rastreamento de partícula.
- saída em cores dos dados.
- animações para resultados dinâmicos.

2.4.8 Aplicação de CFD em Ciclones

Apesar do grande avanço e aumento no poder de processamento dos computadores e a diminuição constante de custo destes, simulações em CFD, *Computational Fluid Dynamics*, para o escoamento no ciclone, em geral necessitam de um tempo de processamento muito alto, o que dificulta a utilização destas em estudos e projetos industriais, devido a aplicação de modelos robustos que visam reproduzir todas as características do escoamento.

A alta anisotropia do campo de turbulência em um escoamento altamente rotacional, requer o uso de modelos de turbulência mais sofisticados e esquemas de discretização de ordens maiores. Além disso, a instabilidade do vórtice interno faz com que sejam necessárias simulações transientes para captar este fenômeno (CORTES; GIL, 2007). Com

objetivo discutir alguns conceitos sobre simulações em ciclones, são apresentados a seguir, alguns referenciais teóricos mais significativos.

Um dos trabalhos pioneiros no estudo do complexo e interessante escoamento em ciclones, usando CFD, foi realizado por Boysan et al. (1982), quando estudaram a simulação de ciclones a partir de técnicas de fluidodinâmica computacional pelo modelo de Lagrange.

Dando continuidade ao estudo de simulação em ciclones, Cristea e Malfa (1994) apresentaram um estudo de simulação tridimensional em um ciclone. No estudo, utilizou-se pela primeira vez um código comercial de simulação o FIUENT 4.2, onde foram avaliados o refinamento da malha, esquemas de discretização e modelo de turbulência.

Por meio de uma simulação tridimensional (3D) via CFD, Cristea e Cogue (1998), simularam o comportamento fluidodinâmico dos componentes vetoriais da velocidade, da queda de pressão, e da eficiência de coleta em ciclones. Como modelo de turbulência, foi utilizado o modelo RANS de *Reynolds Stress Model* (RSM) e para o acoplamento pressão-velocidade foi usado o sistema SIMPLEC, com o esquema de interpolação *UPWIND*. Como resultados, constatou-se que se pode determinar a influência da velocidade flutuante das fases contínua e descontínua, observando regiões de formação de vórtice e zonas de recirculação.

Avci e Karagoz (2003) desenvolveram um modelo matemático para determinação do diâmetro de corte e eficiência individual de coleta em ciclones. No estudo, os autores fizeram considerações sobre: o regime de escoamento, os parâmetros geométricos, as propriedades das partículas e a aceleração. O trabalho, foi considerado que a mistura de fluido e partículas fosse homogênea e que a aceleração diminuiria, dependendo do atrito e da geometria. O modelo proposto pelos autores pode ser utilizado com sucesso para determinar o desempenho de um ciclone. Com os resultados apresentados pelos autores, ratificaram-se que a eficiência de coleta depende do regime de escoamento, que consequentemente é afetado por outros parâmetros como: velocidade de alimentação, temperatura, viscosidade e rugosidade da superfície. Os autores verificaram também, a partir de resultados experimentais e de simulação, que mantendo as demais proporções geométricas constantes, a altura do ciclone interfere positivamente na eficiência de coleta até certo ponto; que a largura da entrada da alimentação tem influência muito significativa sobre o diâmetro de corte e que a altura de entrada da alimentação, que está associado ao diâmetro hidráulico, pode causar alguma alteração dos resultados.

Zhao et al. (2006) simularam o escoamento gás-sólido em dois tipos de ciclones, aos quais se diferenciavam pelo tipo de entrada da alimentação. Um dos ciclones apresentava entrada tangencial convencional, enquanto o outro apresentava dois dutos de entrada em espiral. Para realização das simulações, os autores utilizaram o *software* comercial

FLUENT versão 6.1, ao qual a fase gasosa fora tratada como um meio contínuo, tendo um referencial Euleriano. Para o acoplamento pressão-velocidade, foi utilizado o algoritmo SIMPLE, utilizando o esquema de interpolação QUICK e o modelo de turbulência RSM. A fase discreta, particulada, foi tratada em um referencial lagrangiano, de modo que cada partícula é rastreada desde a entrada de alimentação, até o ponto que seja coletada ou não. Quanto à coleta das partículas, as mesmas eram retidas ao tocar as paredes lateral e de fundo do ciclone. As malhas utilizadas foram do tipo hexaédricas, onde os ciclones com entrada convencional e com entrada dupla em espiral apresentavam 75.700 e 79.620 elementos respectivamente. Quanto às condições de contornos, assumiram um perfil uniforme para a velocidade na entrada do fluido e uma injeção de 4.000 partículas. Na saída, tomaram como condição de contorno o escoamento completamente desenvolvido, enquanto que nas paredes, admitiram a condição de não deslizamento, com aplicação da lei de parede. No estudo, Foi utilizado um passo no tempo de 0,02 s e um critério de convergência de 10^{-3} . Como resultados, o autores verificaram que a utilização de uma entrada dupla, em espiral, aumenta a simetria do escoamento e conseqüentemente propicia uma maior eficiência de separação, mesmo que se tenha uma diminuição na velocidade tangencial. Além disso, no trabalho foi possível verificar que a utilização de técnicas de CFD, mesmo sendo complexas e computacionalmente caras, as simulações numéricas são capazes de fornecer bons resultados.

Shalaby (2007) em sua tese de doutorado, realizou um estudo sobre o potencial da metodologia LES na simulação do escoamento em ciclones. No trabalho, o autor abordou dois diferentes códigos computacionais: um o código comercial CFX 4.4 e o outro o código de pesquisa. Para modelagem da fase discreta, utilizando o código de pesquisa MISTRAL-3D, o autor opta pela abordagem Euleriana-Lagrangiana, por ser indicada para escoamentos dispersos de partículas, similares ao encontrados em ciclones. Para geração das malhas, utilizou-se o software comercial ICEM, gerando duas malhas: uma malha *grosseira*, contendo 660.000 elementos, outra com 1.300.000 elementos denominada de *fina*. Quanto às interações sólido fluido, o autor considera os efeitos da fase contínua sobre a fase discreta, entretanto, despreza os efeitos das partículas na turbulência da fase contínua (*one way*). Com relação às colisões, o autor despreza o choque entre partículas, mas considera as colisões partícula-parede, para o qual utilizou um modelo específico para rugosidade da parede. Na modelagem da turbulência, optou-se por três modelos diferentes, os modelos $k - \omega$ e o modelo das tensões de Reynolds (RSM), quando utilizado o código comercial e o modelo sub-malha de *Smagorinsky*, com a função de amortecimento de *Van Driest*, quando utilizado o código de pesquisa. Em se tratando dos resultados, verificou-se que o modelo $k - \omega$ é inferior aos modelos RSM e LES. No entanto, o autor vai além, afirmando que o modelo de *Smagorinsky* fornece resultados melhores do que o modelo RSM, mesmo para a malha *grosseira*, concluindo que LES é a ferramenta apropriada para

a simulação da turbulência em ciclones.

Kaya e Karagoz (2008) se propuseram a estudar a aplicabilidade de vários esquemas numéricos e modelos de turbulência no estudo do escoamento no interior de ciclone. Utilizando um pacote numérico comercial (FIUENT), na análise tridimensional do escoamento turbulento de um fluido incompressível, os autores puderam concluir que o esquema de interpolação PRESTO para pressão, o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento de turbulência RSM apresentam resultados satisfatórios quando aplicados em escoamentos giratórios, anisotrópicos e complexos como o do ciclone.

Wang (2009) estudou o efeito da concentração de sólidos em um ciclone com entrada em voluta, por meio da dinâmica dos fluidos computacional. No trabalho, foi utilizado o *software* comercial FLUENT v. 6.1. Para modelagem da turbulência, os autores optaram pelo modelo RSM, com o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão velocidade e um esquema QUICK de ordem elevada para as interpolações. Em seus estudos, consideraram como particulados um talco com diâmetros de $1\mu m$, $4\mu m$, $8\mu m$ e $18\mu m$, massa específica de $2.700\text{ Kg}/m^3$ e numa concentração de sólidos na entrada de $0,03\text{ Kg}/m^3$, o que representa uma fração volumétrica para fase sólida muito menor do que 1%, de modo que, com exceção de regiões próximas a paredes, a abordagem Lagrangiana DPM (*Discrete Phase Model*) poderia ser utilizada. Para dispersão turbulenta das partículas, os autores escolheram o modelo DRW (*Discrete Random Walk*). Também consideraram em seu trabalho a transferência de quantidade de movimento, entre partículas e fase gasosa, seguindo uma metodologia de duas vias. As simulações foram realizadas em regime transiente, com passo de tempo igual a $1,0 \times 10^{-4}\text{ s}$, partindo de um campo previamente calculado em regime permanente. Como condições de contorno, na entrada, os autores consideraram que as velocidades, tanto do gás quanto das partículas, eram de 20 m/s e a partir do instante de tempo inicial ($t = 0\text{ s}$), 450 partículas foram continuamente alimentadas por passo de tempo. No duto de saída do *overflow*, admitiram a condição de escoamento perfeitamente desenvolvido, sendo que para manter esta hipótese foi necessário estender este duto. Nas paredes admitiram a condição de não deslizamento, com a utilização de lei de parede para o fluido, e reflexão elástica para partículas; É importante ressaltar que para a determinação do valor do coeficiente de restituição a ser utilizado, os autores realizaram um estudo utilizando o método de tentativa e erro. O número de partículas dentro do ciclone só se estabilizou após 30.000 passos de tempo, e o total de partículas dentro do ciclone ultrapassou $1,0 \times 10^6$. Os autores realizam um estudo detalhado da concentração de partículas ao longo do corpo do ciclone, mostrando variações de concentração. Para determinados diâmetros em regiões parietais, a concentração local chega a ser de até 160 vezes a concentração inicial. Os autores concluem que o escoamento da fase gasosa apresenta modificações significativas devido à presença da fase particulada, e que quanto maior a concentração de sólidos, mais o *swirl* é reduzido. Também constatam

que quanto menor for o diâmetro das partículas maiores serão os efeitos da recirculação de partículas que já estavam no coletor.

Yoshida et al. (2010) realizaram um trabalho com objetivo de avaliar os efeitos da forma do vértice do cone sobre o desempenho na separação de partículas em ciclones, via experimentos empíricos e CFD. No estudo, verificou-se que o ângulo do vértice do cone ótimo é 70° ao qual proporcionou o menor diâmetro de corte. Os autores verificaram que o ângulo do cone afeta o desempenho na separação de partículas em elevadas velocidades de entrada, uma vez que as partículas se encontram longe no ápice do cone.

Em relação ao desempenho do ciclone, Kepa (2010), verificam que a curva de eficiência de coleta pode ser obtida, calculando a razão entre a fração de partículas que escaparam do ciclone e partículas alimentadas.

Gronald e Derksen (2011) simularam o escoamento monofásico em um ciclone, analisando diferentes modelos de turbulência e de discretização. Nas simulações, os resultados obtidos foram analisados à partir de dois diferentes esquemas de discretização: *Lattice-Boltzmann* e volumes finitos. No trabalho, os autores também comparam as metodologias RANS e LES para modelagem da turbulência no ciclone, utilizando, os modelo das tensões de Reynolds (RSM) e o modelo de *Smagorinsky* respectivamente. No estudo, os autores empregaram dois códigos computacionais, sendo: o código comercial Fluent v. 6.3.26, para as simulações que utilizaram o método dos volumes finitos e um código de pesquisa, não-comercial, para as simulações com o método de *Lattice Boltzmann*. Nas simulações com o método dos volumes finitos, os autores utilizaram uma malha contendo aproximadamente $10,0 \times 10^6$ células, para modelagem RANS e aproximadamente $5,0 \times 10^6$ células, para modelagem com a metodologia LES. Nas simulações com o método de *Lattice Boltzmann*, os autores utilizaram um espaçamento de $D/200$. As simulações em regime permanente, com o método de volumes finitos RANS, não levaram à convergência do campo de escoamento; de tal forma que os resultados com a metodologia RANS foram obtidos com uma abordagem transiente. Segundo Gronald e Derksen (2011), os perfis médios de velocidade tangencial obtidos pela metodologia LES, tanto pelo método dos volumes finitos, quanto por *Lattice Boltzmann*, são muito próximos dos perfis experimentais. No entanto, para a abordagem RANS, verificou-se que esta subestima os níveis de velocidade tangencial. Quanto à velocidade axial média, diferentemente da velocidade tangencial, os resultados não apresentaram nada de significativo, em relação às metodologias utilizadas, uma vez que a consistência dos resultados numéricos com os dados experimentais não foi satisfatória. Com os resultados numéricos, os autores puderam afirmar que devido ao movimento de precessão do centro do vórtice (PVC), existe um elevado nível de flutuações nas regiões próximas à região axial, no centro do ciclone. Conforme Gronald e Derksen (2011), enquanto as simulações com o modelo LES foram capazes de capturar corretamente tal

comportamento, o modelo RANS não foi capaz de prever o fenômeno. Portanto, os autores concluem que simulações baseadas em modelos RANS, em malhas relativamente grosseiras, podem fornecer resultados satisfatórios do ponto de vista industrial, com um esforço computacional relativamente baixo; Enquanto que simulações baseadas modelos LES, com malhas finas, são capazes de revelar mais sobre a física do escoamento, com o ônus de um maior custo computacional.

As dimensões da entrada de um ciclone são dimensões fundamentais, cujo efeito sobre o desempenho é bastante significativo. Elsayed e Lacor (2011a) estudaram os efeitos da largura e altura de entrada sobre o campo de escoamento e desempenho do ciclone, utilizando o modelo de turbulência, de tensões de Reynolds (RSM) e modelo fase discreta (DPM), de modo que uma razão ótima entre a largura e altura foi obtida.

Azadi e Azadi (2012) desenvolveram um estudo analítico do efeito da velocidade de entrada sobre o desempenho do ciclone, utilizando um modelo matemático desenvolvido. além disso, também foram analisados os Efeitos da geometria do ciclone e rugosidade superficial. Como resultados, verificou-se que aumentando a velocidade de entrada, propicia a diminuição do diâmetro de corte para variadas geometrias do ciclone. Ainda verificaram que para velocidade superiores a um determinado valor, torna-se o diâmetro de corte independente da velocidade de entrada. Em relação ao efeito da geometria sobre o desempenho do ciclone, verificou que o efeito sobre o desempenho é menos significativo para altas vazões. Em relação à rugosidade superficial, verificou-se que o aumento a rugosidade das paredes do ciclone desacelera as partículas na direção radial e eleva o diâmetro de corte.

Yang et al. (2013), estudaram o efeito das dimensões da alimentação, sobre a eficiência de separação. No estudo, os autores verificaram que o efeito das dimensões de entrada é significativo para o desempenho do ciclone. No trabalho, o efeito das dimensões de entrada sobre a altura ótima do ciclone também foi avaliado, através de experimentos e simulações via CFD. Os resultados experimentais indicaram que a altura ótima do ciclone reduz com a diminuição das dimensões de entrada de ar no ciclone. As simulações via CFD apontaram para uma diminuição do comprimento do vórtice natural, com a redução das dimensões da alimentação. Como resultado, os autores verificaram que o aumento da altura do cone resulta em uma extensão do comprimento vórtice natural e conseqüentemente um incremento na eficiência. Os autores concluíram então que o comprimento do vórtice natural desempenha um papel primordial na determinação a altura ótima do ciclone, e que o efeito das dimensões de entrada de ar, sobre a a altura ótima do ciclone pode ser atribuída á interferência dessas dimensões no comprimento do vórtice natural.

2.4.9 CFD em Meios Porosos

Ao longo dos anos, o projeto de filtros são geralmente baseados em ensaios de laboratórios: protótipos são construídos, testados, modificados e otimizados. Embora tais testes de laboratório seja uma ferramenta valiosa para o projetista, apresenta alguns inconvenientes. Construir e testar um protótipo é na maioria das vezes caro, demanda tempo, e nem sempre permite uma flexibilidade necessária para avaliar as variáveis de desempenho do filtro.

A técnica de CFD permite analisar os efeitos de várias condições, no projeto de filtros, permitindo modificações de forma relativamente rápida. Uma investigação computacional pode ser realizada com notável rapidez. O custo com CFD, na maioria das aplicações é inferior ao custo demandado na construção de uma unidade experimental que permita análise similar. Os resultados apresentados via CFD fornece informações detalhadas e completas. Ele pode fornecer valores de variáveis relevantes (tais como velocidade, pressão, temperatura, concentração, etc) em todo o domínio de interesse. Um engenheiro pode avaliar as implicações de centenas de diferentes configurações em um curto período de tempo e de modo a escolher a melhor condição de projeto.

Aplicação de CFD em Meios Filtrantes

Atualmente, com os recentes avanços em técnicas numéricas, tem possibilitado determinar os perfis de escoamento através de um filtro e prever os valores médios de queda de pressão, conhecendo previamente as propriedades do meio filtrante. Via CFD, é possível avaliar a deposição de particulados no filtro e as alterações resultantes nas propriedades do meio poroso, que levam ao aumento da perda de pressão através do filtro.

Aplicação de CFD em meios filtrantes, visa analisar as influências da velocidade de filtração e da máxima queda de pressão no meio. Uma aplicação pioneira, ao utilizar a metodologia numérica no estudo da filtração, é proposta por Dittler e Kasper (1999), que utilizou 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. No estudo, leva em consideração a espessura e a resistência do fluxo ao próprio meio. Como resultados, verificaram 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.

Tanthapanichakoon et al. (2008) investigaram a remoção de partículas na exaustão de gases de escape em altas temperaturas, usando um filtro de vela de cerâmica duplo. No estudo, os autores utilizando como ferramenta computacional o *software* FLUENT,

para simular o comportamento do escoamento do gás, possibilitando observar o comportamento dinâmico do escoamento do gás na vela em estudo, a distribuição de velocidade na superfície desta, a formação da torta e o pulso de limpeza. Como resultados, os autores, com base em dados experimentais obtidos, verificaram durante a simulação, que a formação da torta sobre a vela cerâmica, apresentou alguma inconsistência: ao invés de ser uniforme, como ocorreu no experimento, a formação da torta na simulação apresentou regiões com diferentes espessuras.

Tung et al. (2006) avaliaram os efeitos do tratamento de calandragem e da permeabilidade dos filamentos de um filtro de tecido, através de análise quantitativa das forças microscópicas. Por meio de simulação numérica, utilizando o software FLUENT 5.5, com o algoritmo SIMPLE e com o esquema de interpolação de segunda ordem *power-law*, foram estudados os perfis de escoamento e a resistência à filtração após a calandragem. A simulação numérica, em regime transiente, utilizando o método de Lagrange, foi capaz de prever o entupimento dos poros e a formação das tortas de filtração, em diferentes tecidos calandrados, com diferentes porosidades e permeabilidades dos filamentos. Como resultados, os autores mostraram que, apesar da resistência ao fluxo de gás aumentar nos tecidos, após a calandragem, a permeabilidade é retificada e o entupimento dos poros do filtro é menor.

Wang et al. (2006b) estudaram a simulação da permeabilidade de tecidos com multifilamentos. Pela primeira vez, uma geometria em 3D, com arranjo hexagonal, para tecidos em multifilamentos, é utilizada para determinar a permeabilidade. Como software numérico, foi utilizado o FLUENT, que contempla o modelo de meios porosos (*porous media*), empregado no estudo, onde é incorporado a resistência ao escoamento no meio poroso por meio da permeabilidade e a espessura do meio filtrante. Como resultados, os autores verificaram que a determinação das permeabilidades via CFD teve boa concordância com o modelo anisotrópico homogêneo de proposto por Gebart (1992). Entretanto, embora os autores tenham encontrado resultados relativamente bons, esses resultados indicaram que o modelo de Gebart subestima a permeabilidade dos tecidos, mesmo em frações de fios de alto volume de sólido.

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

Lo et al. (2010) utilizaram o *software* comercial FLUENT para desenvolver um modelo

numérico para analisar o comportamento de um fluxo transiente em filtros de cartuchos plissados, em um coletor de pó durante a limpeza por jato pulsante. A validação da simulação foi realizada através de valores numéricos para a pressão estática na superfície de um filtro, correspondente a dados experimentais. Os autores concluíram que os valores numéricos apresentaram boa concordância com os dados de teste do filtro durante períodos importantes; de forma que, informações que seriam inviáveis por meio experimental, tornam viáveis a otimização, análises e projeto de filtros, através de CFD.

Rocha (2010), estudou o comportamento de filtros de tecido via fluidodinâmica computacional. O estudo investiga a influência da velocidade de filtração e do número de ciclos na fluidodinâmica do gás através da técnica de CFD. Por meio de CFD, verificou-se que a velocidade de filtração tem maior influência na fluidodinâmica do gás que o número de ciclos. Quanto aos tipos de meio filtrantes de tecidos utilizados, verificou-se que as simulações com tecido de algodão se mostraram bem mais favoráveis à filtração de gases, que as filtrações em feltro de polipropileno.

Corbini (2012) realizou um estudo com um filtro granular de leito fixo utilizado para remoção de material particulado seco, oriundo da queima do carvão. Como parte do trabalho, 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, as linhas de corrente do gás e os pontos de turbulência e recirculação anterior à experimentação. A partir dos resultados das simulações, foi possível afirmar que a simulação computacional se mostrou uma ferramenta importante no estudo de escoamentos em leitos porosos granulares, principalmente na verificação do fenômeno físico e no estudo da geometria. Foi utilizado o modelo de turbulência $k - \omega$, que apresentou boa convergência para o problema. Entretanto, os resultados computacionais obtidos no trabalho não foram tão precisos, apresentando um desvio em torno de 37% nas simulações quando fora utilizado o valor teórico da permeabilidade e 85% quando a simulação foi realizada com valor experimental. A principal justificativa, segundo a autora, está no emprego da Lei de Darcy e nas simplificações feitas no modelo, utilizadas no *Software* ANSYS® CFX 11.0, para descrever escoamentos em meios porosos; pois, conforme a autora, esta lei não se mostrou eficiente para o problema estudado, por não considerar algumas variáveis de grande importância deste fenômeno, como: a esfericidade e o diâmetro das partículas do leito.

Hosseini e Tafreshi (2012), propuseram uma metodologia para simulação de queda de pressão e eficiência de coleta num filtro médio, durante o carregamento instantâneo de partículas, usando o código comercial FLUENT. Para determinar a eficiência de coleta das partículas e os locais de deposição das partículas sobre as fibras, as simulações compreendiam em resolver os campos de escoamento do ar e as trajetórias das partículas, segundo

o princípio de Lagrange. Como resultados, os autores verificaram que a estratégia de modelagem apresentada no trabalho permitia rastrear partículas de diferentes tamanhos, possibilitando identificar a formação depósitos. Verificando que as taxas de aumento da eficiência de coleta e da queda de pressão são maiores para filtros carregados com partículas menores, quando a quantidade de massa alimentada era mantida constante. Caso contrário, simulando uma fibra com um diâmetro de $20 \mu m$, carregadas com partículas com um diâmetro de $2 \mu m$, observaram que quase nenhum aumento na taxa de eficiência de coleta das partículas, e um aumento bem menos pronunciado queda pressão.

Saleh e Tafreshi (2014), propuseram um modelo semi-numérico, 2-D, para prever a queda de pressão instantânea e eficiência de coleta de filtros, confeccionados de pregas retangulares e triangulares. Inspirado de simulações anteriores CFD, o modelo semi-numérico utiliza perfis médios de velocidade, nas direções axiais e laterais. Com resultados, os autores verificaram que o modelo permite prever a queda de pressão instantânea e eficiência de coleta de um filtro com um tempo de CPU mínimo.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos



ESTE CAPÍTULO apresenta uma descrição detalhada da unidade experimental e demais recursos materiais e computacionais empregados no desenvolvimento do trabalho, assim como as metodologias utilizadas nos experimentos de laboratório e numéricos.

3.1 Sistema Experimental

O sistema experimental utilizado para análise do despenho de ciclones convencional e filtrante consiste basicamente em um sistema de transporte pneumático gás-sólido, desenvolvido para realização deste trabalho. O sistema experimental foi desenvolvido no laboratório de operações unitárias do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) do *Campus* Montes Claros. A construção e implementação da unidade experimental visa futuramente o desenvolvimento de diversos trabalhos nas linhas de pesquisa de processos de separação e transporte pneumático.

O sistema experimental foi idealizado a fim de se obter medidas macroscópicas médias de vazão, pressão, velocidade, eficiência de separação e o coeficiente de permeabilidade dos filtros. O sistema funciona por pressão positiva por meio de um exaustor centrifugo localizado no início da tubulação, sendo acionado e controlado por um inversor de frequência conforme Figuras 3.1, 3.2 e 3.3, que ilustram o esquema geral do aparato experimental utilizado para os ciclones convencional e filtrante.

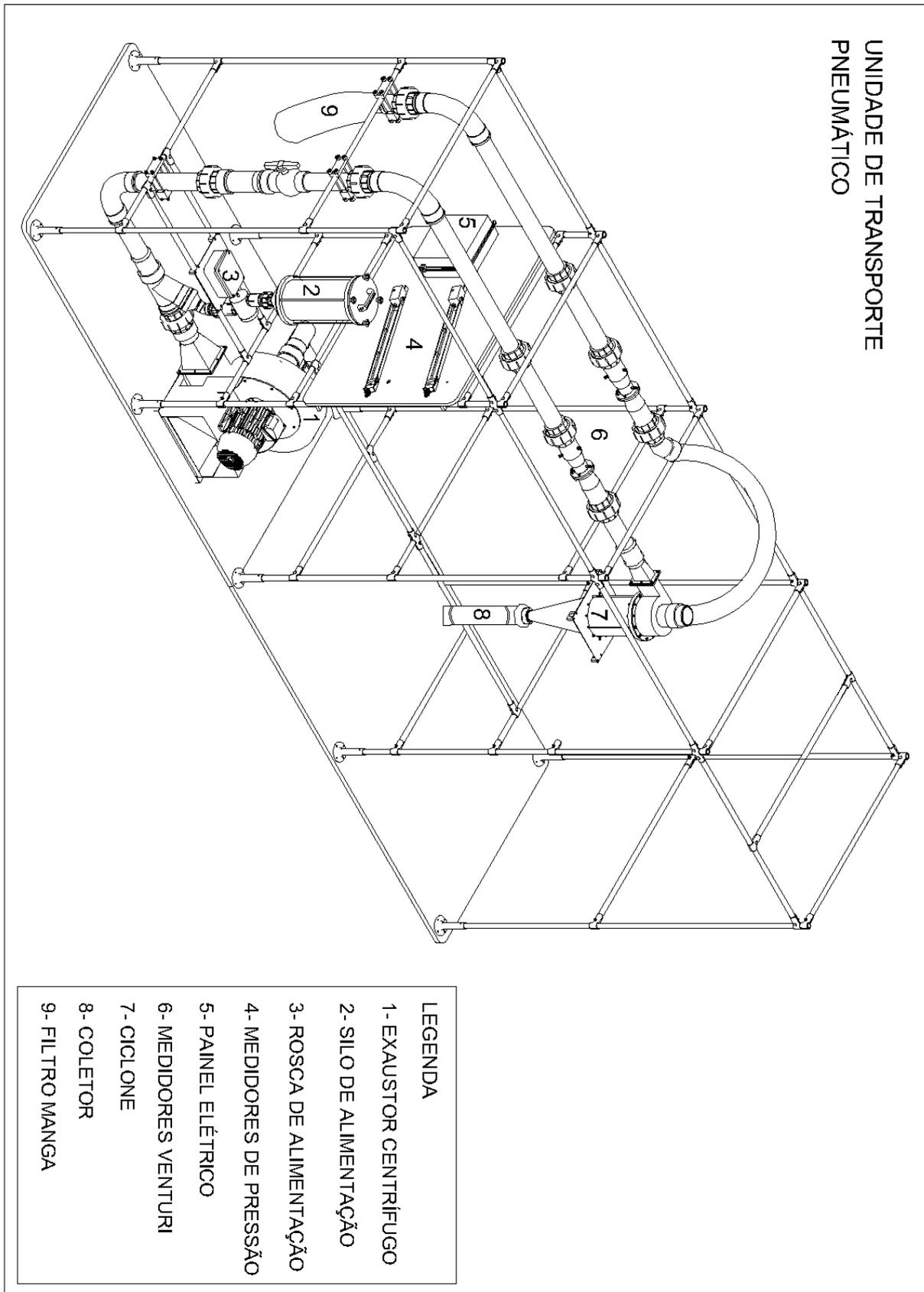


Figura 3.1: Esquema geral da unidade experimental de transporte pneumático.



Figura 3.2: Esquema geral da unidade experimental para o ciclone convencional.



Figura 3.3: Esquema geral da unidade experimental para o ciclone filtrante.

O sistema experimental é composto por:

- 01 circuito de transporte pneumático que possibilita alteração de meio de retenção de particulados;
- 01 módulo de ciclone convencional/filtrante, com visor na parte cilíndrica, dotado de um reservatório para coleta dos sólidos (*hooper*), conforme configuração apresentada pela Figura 3.2;
- 01 alimentador volumétrico de sólidos do tipo rosca, controlado por inversor de frequência, para alimentação de particulados no circuito de transporte pneumático;
- 02 medidores de vazão tipo Venturi idênticos;
- 01 termômetro de mercúrio;
- 01 circuito pneumático, construído com dutos de 75 mm de diâmetro composto por seções em acrílico para visualização do fluxo de alimentação e com um comprimento total de 6 m;
- 01 exaustor centrífugo tipo *limit load* de 5 CV;
- 01 inversor de frequência para controle de rotação/vazão;
- 01 painel composto por 04 manômetros de tubo em U para medição de pressão diferencial e para medição das perda de carga do ciclone;
- 01 painel elétrico, construído conforme NR 10, provido de controle de rotação de do exaustor e das válvulas rotativas do sistema;
- 01 filtro de mangas, no *overflow*.

A dimensões básicas do ciclone, em milímetros, tanto para o ciclone convencional, quanto filtrante, estão representados na Figura 3.4.

3.1.1 Controle de Vazão da Fase Gasosa

O escoamento é iniciado através do acionamento do exaustor centrífugo, localizado no início da linha de transporte pneumático, por meio de um controle manual no inversor de frequência. Na linha de alimentação de ar, existe um venturi e um termômetro, através dos quais tornam possível a determinação das vazões volumétricas e mássicas da fase gasosa e estimando também a velocidade na entrada do ciclone, utilizada para a execução dos experimentos.

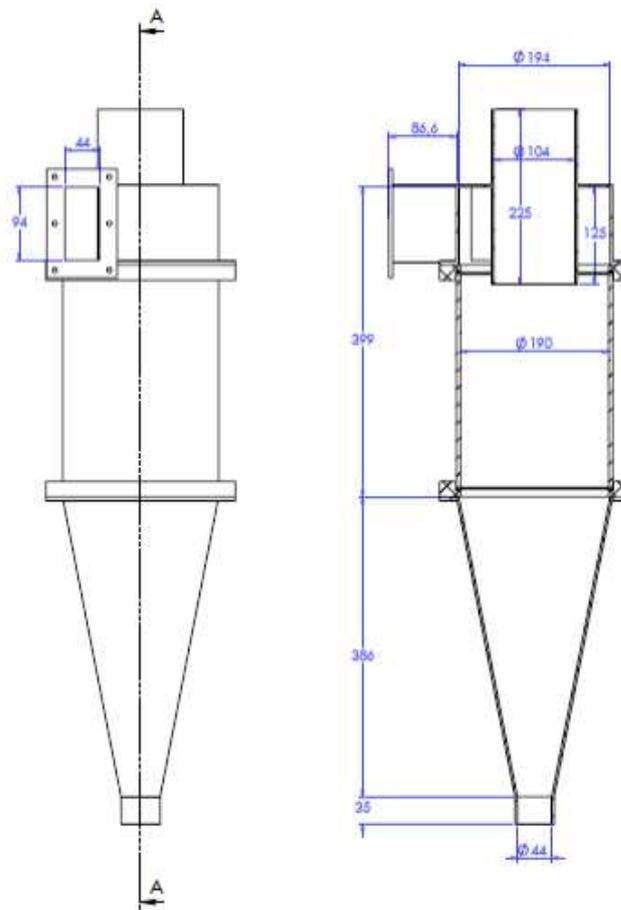


Figura 3.4: Dimensões básicas dos ciclones.

A Figura 3.5 apresenta o gráfico de calibração do venturi, em função da pressão diferencial obtida no manômetro inclinado e da velocidade média na entrada do ciclone. A partir das medidas de pressão de pressão diferencial em um manômetro inclinado, foi possível determinar a velocidade média de entrada no ciclone.

3.1.2 Controle de Alimentação de Particulados

Uma outra variável a ser controlada é a vazão de alimentação de particulados. Esta alimentação é realizada por uma rosca dosadora conectada a um inversor de frequência que regula a entrada de sólido no sistema. A razão de carga (R_C) pode ser calculada através do quociente entre a vazão mássica de sólidos alimentados (\dot{m}_S) e a vazão volumétrica de gás (Q_g), conforme apresentado na Equação 3.1.

$$R_C = \frac{\dot{m}_S}{Q_g} \quad (3.1)$$

Para uma melhor distribuição de partículas ao longo do duto, que leva à entrada do

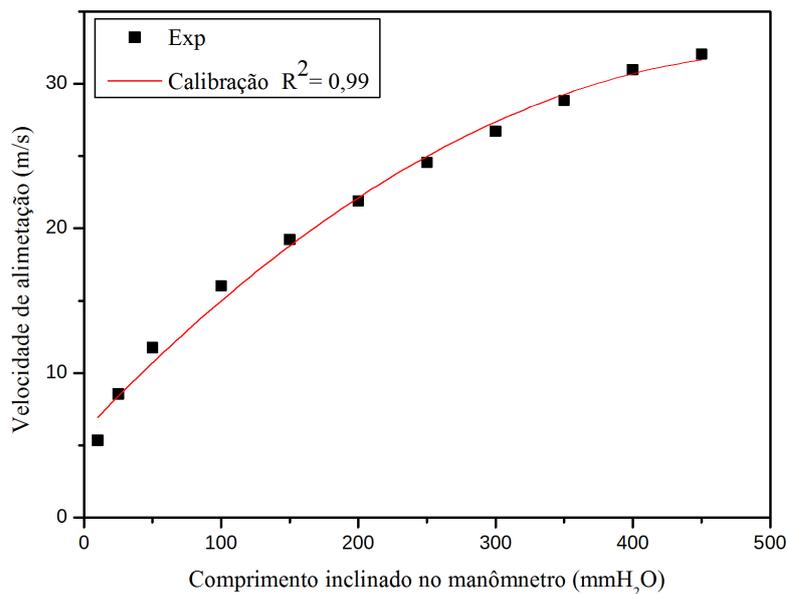


Figura 3.5: Curva de calibração do venturi.

ciclone, um tubo interno fora conectado à rosca dosadora de alimentação, de forma a promover uma melhor mistura e sucção das partículas, ao serem carregadas pelo fluxo de ar do sistema, o que se traduz em uma dispersão mais homogênea de partículas no meio. Detalhes do sistema de alimentação de particulados, podem ser visualizados na Figura 3.6.

A fim de se controlar a vazão de sólidos alimentados, conforme a frequência no inversor, foi realizada a calibração da rosca de alimentação, conforme o tipo de particulados alimentado. Para a magnesita, a calibração está disposta na Figura 3.7

3.1.3 Caracterização do Material Particulado

O material particulado utilizado foi o pó de Magnesita fornecido pela Empresa MAGNESITA S.A localizada em Contagem Minas Gerais. A caracterização do material particulado foi uma das etapas fundamentais ao se estudar o comportamento fluidodinâmico da partícula no interior do ciclone. Entre as propriedades fundamentais das partículas, se encontram a determinação da massa específica e da distribuição granulométrica do particulado.



Figura 3.6: Sistema de alimentação de particulados.

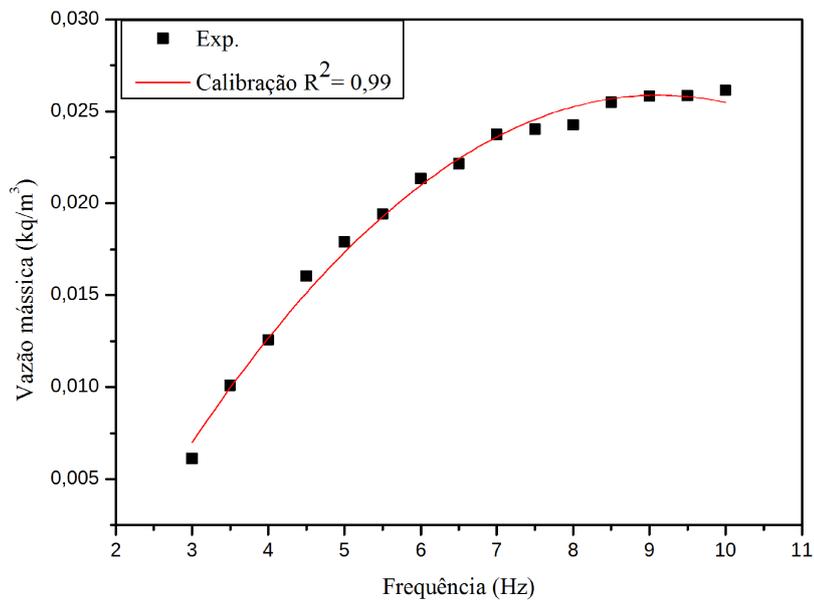


Figura 3.7: Curva de calibração do sistema de alimentação para magnesita.

Determinação da Massa Específica Aparente

A massa específica dos sólidos foi determinada experimentalmente por picnometria. As massas utilizadas na determinação da massa específica são:

- M_1 é a massa do picnômetro vazio;
- M_2 é a massa do picnômetro contendo somente a mostra de particulado;
- M_3 é a massa referente ao picnômetro contendo a amostra e completado com o fluido picnométrico (água), até atingir o volume total;
- M_4 é a massa do picnômetro cheio, contendo somente o fluido picnométrico

Através da leitura das massas supracitadas devidamente pesadas em uma balança semi-analítica de com precisão ($\pm 0,001$ g), foi possível determinar a massa específica do sólido a partir da Equação 3.2, uma vez que a massa da amostra é $[M_2 - M_1]$ e o volume é $[(M_4 - M_3) - (M_2 - M_1)] / \rho$, onde ρ é a massa específica do fluido picnométrico.

$$\rho_p = \frac{[M_2 - M_1] \rho}{[(M_4 - M_3) - (M_2 - M_1)]} \quad (3.2)$$

A massa específica aparente da magnesita encontrada por este método foi de $(2,88 \pm 0,01)$ g/cm³.

Determinação da Distribuição Granulométrica

A curva de distribuição granulométrica, para caracterização da amostra de partículas, foi obtida com a técnica de difração *laser* através de um *Malvern Mastersizer 3000* que realiza análises de distribuição do tamanho de partícula na faixa de 0,01 a 3500 micrômetros. Este é um método volumétrico e os cálculos para determinação do tamanho de partículas é baseado no modelo matemático de espalhamento de Mie, que considera as partículas como sendo esféricas e não são opacas.

Para realizar uma análise utilizando tal técnica toma-se uma amostra de sólido de aproximadamente dois gramas, coloca-se em um béquer de 500 mL contendo água deionizada. Adicionam-se ao béquer cinco gotas do defloculante policrilato de sódio seguido de 1 min sob agitação e ultra-som a fim de separar partículas eventualmente aglomeradas. A suspensão é analisada pelo equipamento que fornece a distribuição granulométrica da amostra. A distribuição é caracterizada por uma fração em volume de partículas Y com diâmetro inferior ou igual a D , característico de cada tipo de análise.

Para cada amostra analisada são retiradas 5 leituras com intervalo de 1 segundo, onde destas leituras é feita uma média aritmética para obtenção da média das frações volumétricas acumulativa de cada experimento.

Todas as análises granulométricas desta tese foram realizadas no laboratório de controle de produção da RIMA Industrial SA, que produz a linha completa de produtos de magnésio, destacando os lingotes de magnésio metálico, as diferentes ligas de magnésio, magnésio em pó e dessulfurantes à base de magnésio e peças fundidas em ligas de magnésio, localizada na cidade de Capitão Enéas no norte de Minas Gerais. A distribuição granulométrica cumulativa da amostra é apresentada na Figura 3.8.

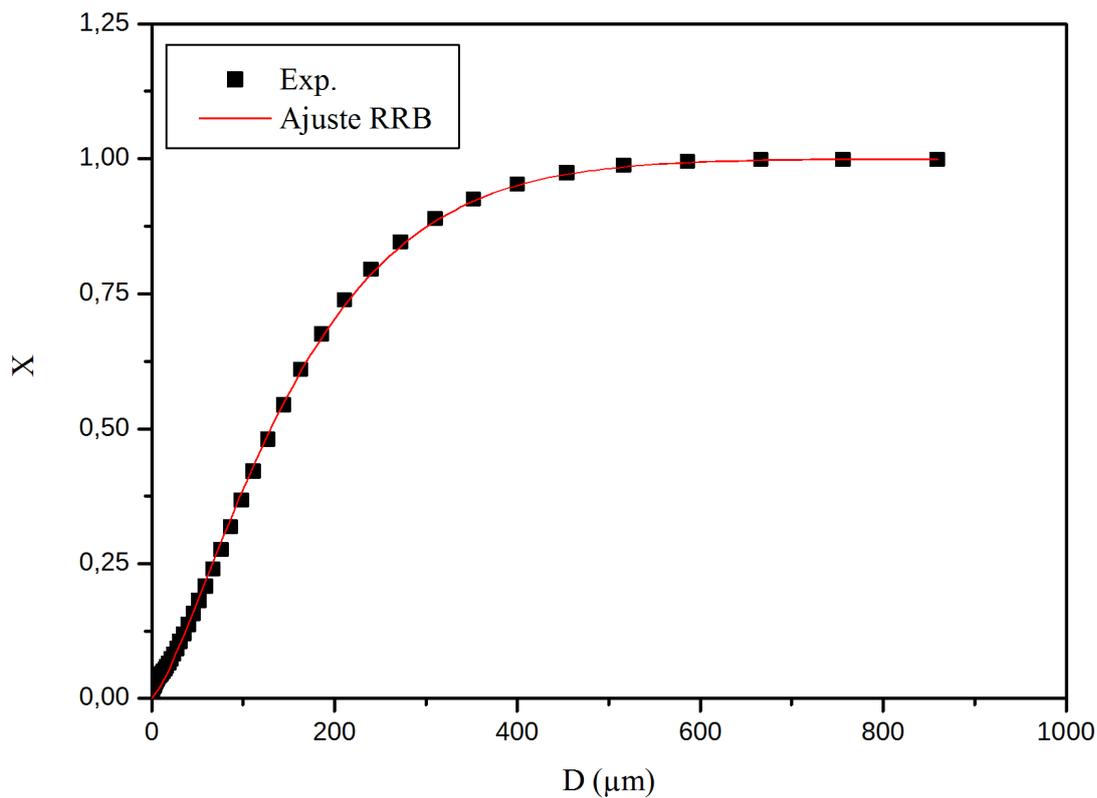


Figura 3.8: Distribuição Granulométrica acumulativa da Magnesita

Para a representação das distribuições granulométricas dos sólidos utilizou-se o modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB) apresentado na Equação (2.9), sendo D' e n determinados por técnicas de regressão não-linear.

Os parâmetros ajustáveis do modelo RRB, para representações de distribuições de tamanhos de partículas da magnesita referente à Figura 3.8 estão contidos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Parâmetros do ajuste RRB.

Sólido	Parâmetros do ajuste RRB		r^2
	$D'[\mu m]$	$n [-]$	
Magnesita	$172,38 \pm 1,49$	$1,308 \pm 0,01$	0,998

Os coeficientes de correlações quadráticos r^2 para os ajuste dos parâmetros d' e n , apresentados na Tabela 3.1, indicam que, em média, 99% da variabilidade dos resultados experimentais podem ser explicados pelo modelo.

3.1.4 Determinação da Permeabilidade e do Coeficiente de Resistência Inercial do Meio Filtrante

A permeabilidade do meio filtrante, conforme Massarani (1997), caracteriza o grau de facilidade em que o fluido se move no meio filtrante. Esta propriedade é determinada experimentalmente por permeametria, através de um conjunto de medidas de vazão e de queda de pressão efetuadas. Com o ajuste aos resultados experimentais a modelos específicos, se calcula a permeabilidade.

O meio filtrante utilizado no tronco de cone filtrante foi o polipropileno, com espessura de 2 milímetros, ao qual foram modelados para formar um tronco de cone, firme e rígido, que completa a parte inferior do ciclone filtrante, conectando ao coletor.

A determinação da permeabilidade do meio filtrante é um dos pontos chave ao se estudar ciclones filtrantes. Ao analisar o comportamento em ciclones filtrantes verifica-se que a permeabilidade interfere significativamente no comportamento fluidodinâmico no interior do ciclone (RODRIGUES, 2001). Entretanto, dada as inconsistências apresentadas por Rodrigues (2001) e Lacerda (2007) na forma de determinação da permeabilidade no cone filtrante, a metodologia proposta pelos autores ainda não é um consenso. Portanto, faz parte dos objetivos desta tese propor e discutir metodologias alternativas para se determinar a permeabilidade do meio filtrante.

As permeabilidades do meio filtrante, foram determinadas a partir das seguintes Metodologias:

- **Metodologia 01**, convencional, utilizada por Rocha (2010);
- **Metodologia 02**, uma adaptação à metodologia do LABSEP-UFU, utilizada por Rodrigues et al. (2003);

- **Metodologia 03**, uma nova metodologia, proposta da tese.

Para as metodologias propostas, com os experimentos com tecidos inicialmente novos percebeu-se um aumento gradativo na queda de pressão. Este aumento ocorreu devido o material particulado alimentado ocupar o espaço entre as fibras do polipropileno devido a filtração interna, ficando ali retidos (colmatação). A etapa de colmatação ocorreu durante um período de tempo curto e logo estabeleceu um estágio em que a pressão se mantém constante com a vazão; indicando que a colmatação do meio se completou, não havendo o crescimento e formação de torta devido o cisalhamento. A partir de então foram tomadas as medidas de queda de pressão conforme a vazão volumétrica de alimentação.

A caracterização dos meios filtrantes foi conduzida conforme as metodologias propostas, correlacionando seja a velocidade superficial, associada à vazão volumétrica do fluido que atravessava a parede filtrante, com a queda de pressão no meio filtrante. As equações para cada metodologia foram obtidas a partir das equações da continuidade e de momento associadas às equações de Darcy e *Forchheimer*, considerando o fluido (ar) como incompressível e com escoamento unidirecional no filtro. A obtenção das equações são discutidas no Capítulo 4 e apresentadas nos apêndices A, B e C.

Nas metodologias apresentadas, o objetivo é determinar a permeabilidade via ajuste dos resultados experimentais. Conhecendo diferentes vazões volumétricas de alimentação, associadas às respectivas quedas de pressão no filtro, poderia se obter o valor da permeabilidade do meio filtrante (K), uma vez que as demais propriedades do sistema eram todas conhecidas (propriedades do fluido e dimensões geométricas do tronco de cone). Portanto, as estimativas da permeabilidade e do coeficiente de resistência inercial foram obtidas através de regressões lineares e não lineares, ajustando às equações de Darcy e *Forchheimer*, empregando o *software* STATISTICA®[®], cujos valores estão no Apêndice D.

Metodologia 01 para Determinação da Permeabilidade do Meio Filtrante

Conforme apresentado anteriormente, para se determinar a permeabilidade do meio filtrante, uma das metodologias utilizadas foi a metodologia convencional de permeabilidade, utilizada por Rocha (2010). Nesta metodologia a permeabilidade foi determinada experimentalmente variando a velocidade superficial que o ar perpassa pelo meio filtrante, uma vez que a vazão de escoamento e a área normal ao sentido do fluxo eram conhecidas. Para cada medida de vazão, eram medidas a pressão diferencial resultante no meio filtrante, por meio de um manômetro inclinado. Com os resultados experimentais de queda de pressão e velocidade superficial obtidos a partir da vazão volumétrica e da área de

filtração, construíram-se as curvas que possibilitaram ajustes para determinar a permeabilidade, tomando a Equação 2.14 de Darcy, e a permeabilidade e a constante inercial de filtração, a partir da Equação 2.15 de Forchheimer.

O equipamento utilizado nesta metodologia consistiu de um duto de diâmetro interno 90 milímetros, provido com duas tomadas de pressão estática, separadas por uma distância de 2 milímetros (espessura do filtro). O meio poroso foi fixado no interior do tubo, conforme ilustra a Figura 3.9. A vazão de ar era controlada manualmente, através de um inversor de frequência e medida através de um rotâmetro.



Figura 3.9: Estrutura de filtração similar ao utilizado por Rocha (2010) .

Metodologia 02 para Determinação da Permeabilidade do Meio Filtrante

A metodologia 02, para determinação da permeabilidade do meio filtrante, fundamentou-se em uma modificação da metodologia do LABSEP-UFU, utilizada por Rodrigues et al. (2003). Na metodologia utilizada por Rodrigues et al. (2003), os dados de vazão e de queda de pressão, foram obtidos na própria unidade experimental, com a vedação dos dutos de saída do *underflow* e do *overflow*, conforme a Figura 3.10. Desde modo, a saída de ar ocorria somente pelo tronco de cone de tecido. Nos experimentos propostos pelo autor, a velocidade de entrada do ar era medida através de uma placa de orifício ligada a um manômetro diferencial e a pressão diferencial do filtro era a própria queda de pressão

no ciclone (entre entrada e saída do *overflow*), que também era determinada pelo desnível da coluna de água do manômetro. Sendo assim, dispondo-se destes pares de valores e das características geométricas dos meios, a permeabilidade poderia ser obtida através de uma regressão linear, uma vez que fora aplicada à equação de Darcy 2.14.



Figura 3.10: Esquema de filtração com vedação do *overflow*

A alteração da metodologia utilizada por Rodrigues et al. (2003), proposta nesta tese, fundamenta-se nas tomadas das medidas de queda de pressão no filtro, utilizadas para determinação da permeabilidade. Enquanto o autor utilizou a própria queda de pressão no ciclone, entre entrada e saída do *overflow*; nesta metodologia, utilizou-se a queda de pressão no tronco de cone filtrante, conforme a Figura 3.10. Para cada vazão de alimentação, media-se a queda de pressão entre o topo e o vértice do tronco de cone, de modo que, através do conhecimento da área do meio filtrante, determinava-se a velocidade média superficial de filtração.

Nesta tese, utilizando esta metodologia, a vazão de alimentação foi determinada a partir de um tubo venturi, localizado na linha de alimentação do ciclone, conforme apresentado na Figura 3.3. A queda de pressão entre o topo e o vértice do tronco de cone foi determinada por monômetros em U, que utilizava água com fluido manométrico, representados na Figura 3.11. Como não havia saídas extras, que não via o filtro, a vazão

volumétrica era a mesma de alimentação, de modo que, com o conhecimento da área superficial plana de filtração, determinava-se a velocidade superficial.



Figura 3.11: Sistema de medição das quedas de pressão no ciclone.

Com os resultados de vazão e queda de pressão no meio filtrante, conhecendo a área planificada do filtro, a partir das correlações propostas por de Darcy e Forchheimer, determinava-se a permeabilidade (K) e constante inercial de filtração (C_2). Os resultados oriundos dos experimentos estão dispostos no Apêndice D.

Metodologia 03 para Determinação da Permeabilidade do Meio Filtrante

Verificando que ambas as metodologias apresentadas anteriormente fundamentam-se em equações obtidas a partir de correlações em coordenadas cartesianas, com fluxo normal à superfície plana do filtro e com escoamentos diferentes daqueles encontrados em ciclones, esta tese propôs uma metodologia utilizando coordenadas esféricas para obtenção das equações a serem ajustadas aos resultados de queda de pressão, vazão e velocidade superficial de filtração.

Diferentemente do método anterior, a vazão de alimentação não era igual a vazão de

fluido filtrado. Nesta metodologia, o tubo de saída do *overflow* não era vedado, de forma que, além do fluxo de saída referente ao filtro, existia ainda uma saída extra no *overflow*. Semelhante à forma de determinação da vazão de alimentação, esta vazão de saída no *overflow* foi determinada em um medidor de vazão tipo venturi idêntico ao localizado na linha de alimentação do fluxo, imediatamente após o ciclone. A estrutura utilizada pode ser visualizado na Figura 3.3.

A vazão de filtração neste caso era exatamente a diferença entre a vazão de alimentação de ar na entrada do ciclone e aquela determinada na saída do *overflow*. Através da vazão de filtrado possibilita-se a determinação da velocidade superficial de filtração. Essa forma de determinação da permeabilidade reflete o real comportamento do processo de filtração que ocorre em ciclones filtrantes, quando em funcionamento. Os resultados determinados experimentalmente, estão presentes no Apêndice D.

Para determinação da permeabilidade e do coeficiente de resistência inercial, foram tomadas as medidas de queda de pressão no topo e no vértice do tronco de cone, semelhante à metodologia 2. A partir da Equação 3.3, obtida a partir da equação de *Forchheimer*, ao qual levou-se em consideração o efeito geométrico da área do cone, determinou-se a permeabilidade do meio filtrante. A forma de obtenção da Equação 3.3 é discutida em detalhes no Apêndice C.

$$\Delta P = \frac{\mu L}{K\pi \text{sen}\theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) Q + \frac{C_2 \rho L}{2\pi^2 \text{sen}^2\theta} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) Q^2 \quad (3.3)$$

3.1.5 Determinação das Medidas de Queda de Pressão nos Ciclonas

As medições de queda de pressão no ciclone, obtidas durante os experimentos realizados na unidade experimental, são primordiais para análise do desempenho do ciclone, uma vez que estas medidas também são utilizadas para validação dos modelos numéricos. Os valores das quedas de pressão foram determinados através da medição da pressão estática na entrada do ciclone, uma vez que a saída do *overflow* estava aberto à atmosfera, para este fim. Para isso, foram utilizados os manômetros apresentados na Figura 3.11

3.1.6 Medidas de Eficiência Global de Coleta

O desempenho de um ciclone pode ser definido basicamente por dois fatores, a queda de pressão, que se relaciona com o custo de operação do equipamento no que tange ao consumo de energia e a eficiência de coleta que, segundo Bernardo (2005), pode ser definida

como a razão entre a massa de sólidos coletada e a massa de sólidos introduzida no ciclone.

A eficiência global de coleta é obtida experimentalmente através da razão da massa de sólido coletada no coletor, localizado no fundo do ciclone, e a massa de sólido alimentado na entrada do ciclone. A massa alimentada foi medida com uma balança semi-analítica de precisão ($\pm 0,001$ g), ao qual a vazão de alimentação de partícula é controlada via um inversor de frequência, conforme curva de calibração apresentada na Figura 3.7. Ao final do experimento, o material sólido coletado no recipiente coletor é retirado e sua massa é medida.

3.2 Modelagem Computacional

Nesta seção, são apresentados os materiais e metodologia numérica utilizados na resolução do campo de escoamento inerentes aos escoamentos em ciclones convencional e filtrante.

3.2.1 Configurações dos Ciclones

As dimensões dos ciclones são apresentadas na Tabela 3.2, conforme dimensões apresentadas na Figura 3.4.

Tabela 3.2: Dimensões dos ciclones.

Dimensões	Filtrante (mm)	Convencional (mm)
Diâmetro do cilindro (D_c)	190	190
Altura total do ciclone (H_t)	820	820
Altura da alimentação (a)	94	94
Largura da alimentação (b)	44	44
Diâmetro do <i>vortex finder</i> (D_x)	104	104
Comprimento do <i>vortex finder</i> (S)	125	125
Altura do Cilindro (h)	399	399
Altura da seção cônica (h_c)	386	386
Diâmetro do <i>underflow</i> (B_c)	44	44

Para realização das simulações, a fim de averiguar o efeito geométrico do comprimento da altura da alimentação, somente esta dimensão foi alterada para a configuração do ciclone. As outras variáveis independentes analisadas foram a vazão volumétrica de alimentação e a permeabilidade do meio filtrante. Para isso foi elaborado um planejamento estatístico.

3.2.2 Planejamento dos Experimentos Numéricos

O planejamento experimental é essencial no desenvolvimento científico. A execução de um experimento é apenas um teste ou uma série de testes. Muitos experimentos são realizados a todo momento, entretanto, a validade das conclusões oriundas dependem, em grande parte, da forma como os experimentos foram executados. Portanto, o planejamento dos experimentos desempenha uma papel primordial na solução do problema que o motivou (MONTGOMERY; RUNGER, 2010).

Quando várias variáveis influenciam na resposta, existem diferentes possibilidades de planejamentos experimentais. Entre os diversos métodos existentes na literatura, um dos mais utilizados é o planejamento fatorial (BOX et al., 1978).

A preocupação inerente à utilização de planejamento fatorial em dois níveis é o pressuposto de linearidade. Nem sempre a linearidade é um fator necessário, podendo ser desnecessária e, muitas vezes, esta pode ser simplesmente aproximada (MONTGOMERY; RUNGER, 2010). Uma alternativa ao método puramente fatorial é Planejamento Composto Central (PCC). O PCC é um planejamento fatorial de primeira ordem, aumentado por certos pontos adicionais, de modo a permitir a estimação de parâmetros independentes de uma superfície de segunda ordem que normalmente é utilizado quando se tem uma quantidade excessiva de experimentos.

Dado ao exposto, a fim de dar uma maior abrangência ao planejamento experimental, um planejamento composto central ortogonal foi elaborado. No PCC, utilizou-se um planejamento fatorial a dois níveis com três variáveis acrescido de quatro réplicas localizados no ponto central e seis experimentos nos pontos axiais (α), totalizando 18 experimentos apresentados na Tabela 3.3. As variáveis analisadas nos experimentos foram:

- X_1 - Comprimento da altura da alimentação (m);
- X_2 - Vazão volumétrica de alimentação (m^3/s);
- X_3 - Permeabilidade do meio filtrante (m^2).

Os valores referentes aos níveis de permeabilidade foram estabelecidos a partir de testes e experimentos realizados previamente. Os valores referentes aos níveis de vazão de alimentação no ciclone foram retirados da literatura, condicionados à faixa de velocidade de alimentação estabelecida para ciclones. Por sua vez, o comprimento da altura da alimentação baseou-se em algumas referências que associam tal dimensão com o melhor

desempenho do equipamento.

$$\begin{aligned}
 X_i &= 2 \frac{(\xi_i - \bar{\xi}_i)}{d_i} \\
 \xi_i &= X \\
 \bar{\xi}_i &= \frac{(X_{+1} + X_{-1})}{2} \\
 d_i &= X_{+1} - X_{-1}
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

onde:

X_i : valor da variável codificada;

X : valor da variável real a ser calculado;

X_{+1} : valor da variável original no nível alto;

X_{-1} : valor da variável original no nível baixo;

Tabela 3.3: Matriz do Planejamento Experimental

Variáveis codificadas				Variáveis não codificadas		
Experimento	X_1	X_2	X_3	$a(m)$	$Q_v(m^3/s)$	$K(m^2)$
1	-1	-1	-1	0,057	0,04	$1,00 \times 10^{-11}$
2	-1	-1	+1	0,057	0,04	$5,00 \times 10^{-11}$
3	-1	+1	-1	0,057	0,08	$1,00 \times 10^{-11}$
4	-1	+1	+1	0,057	0,08	$5,00 \times 10^{-11}$
5	+1	-1	-1	0,133	0,04	$1,00 \times 10^{-11}$
6	+1	-1	+1	0,133	0,04	$5,00 \times 10^{-11}$
7	+1	+1	-1	0,133	0,08	$1,00 \times 10^{-11}$
8	+1	+1	+1	0,133	0,08	$5,00 \times 10^{-11}$
9	$-\alpha$	0	0	0,041	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$
10	$+\alpha$	0	0	0,149	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$
11	0	$-\alpha$	0	0,095	0,032	$3,00 \times 10^{-11}$
12	0	$+\alpha$	0	0,095	0,088	$3,00 \times 10^{-11}$
13	0	0	$-\alpha$	0,095	0,06	$1,72 \times 10^{-12}$
14	0	0	$+\alpha$	0,095	0,06	$5,83 \times 10^{-11}$
15	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$
16	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$
17	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$
18	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$

O valor de α selecionado foi 1,414, obtido a partir da Equação 3.5, a fim de proporcionar um PCC ortogonal, isto é, um planejamento onde a matriz de variância e covariância são diagonais e os parâmetros estimados não são correlacionados entre si (BOX et al., 1978). A partir das variáveis codificadas é possível determinar as mesmas não codificadas

utilizando a Equação 3.4.

$$\begin{aligned}\alpha &= \left(\frac{Q \cdot G}{4}\right)^{1/4} \\ Q &= \left[(G + T)^{1/2} - G^{1/2} \right]^2\end{aligned}\tag{3.5}$$

em que G é o número de pontos fatoriais ($G = 2^k$), se completo, T é o número de pontos adicionais no PCC ($T = 2^k$ + número de réplicas centrais) e k é o número de variáveis.

Metodologia de Superfície de Resposta (MSR)

A Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) tem como fundamento o planejamento fatorial dos experimentos (BOX et al., 1978). A MSR é um conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas que são indispensáveis para análise e geração de modelos em aplicações onde a variável resposta é influenciada por diversas variáveis e cujo objetivo seja otimização (MONTGOMERY; RUNGER, 2010). Portanto, na caracterização de um experimento, quando se objetiva determinar quais fatores afetam a resposta, a etapa lógica seguinte é determinar a região na qual os fatores mais importantes levam a uma resposta ótima.

A Metodologia de Superfície Resposta vem sendo utilizada frequentemente nos campos da engenharia e da indústria, onde há necessidade de se avaliar vários parâmetros (ELSAIED; LACOR, 2011b). Portanto, a fim de realizar a análise via MSR foram realizados primeiro os experimentos definidos na matriz de planejamento apresentada na Tabela 3.3. Com os experimentos realizados, tendo como variáveis resposta o número de Euler (E_u) e a Razão de filtrato (R_f), foi possível ajustar os resultados numéricos experimentais tabulados. O ajuste dos dados experimentais foi realizado com o auxílio do *software* Statistica 7.0, usando regressão múltipla, pelo método dos mínimos quadrados. Com a determinação dos parâmetros pode-se ajustar os dados a um polinômio de 2ª ordem, representado em sua forma generalizada pela Equação 3.6.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_{ii}^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j\tag{3.6}$$

Na Equação 3.6, β_0 , β_i , β_{ii} , e β_{ij} são os coeficientes de regressão associados ao termos linear, quadrático e de interação respectivamente. Por sua vez, X_i e X_j são variáveis independentes e Y é a variável de resposta (Número de Euler e Razão de filtrado).

3.2.3 Estrutura Computacional

As simulações foram realizadas em um *cluster* formado por seis computadores com processador Intel® Core i5 e 8GB de memória em paralelo, utilizando o *software* FLUENT 14.0 da *ANSYS Technology*. A utilização de *clusters* visa substituir os computadores de alta performance, que normalmente demandam um custo elevado. A estrutura computacional utilizada é apresentada na Figura 3.12



Figura 3.12: Sistema computacional utilizado.

3.2.4 Construção das Geometrias e Malhas

Nesta etapa de elaboração das geometrias e construções de malhas, que se encontra na fase de pré-processamento, foi utilizada uma ferramenta de modelagem de geometrias, o *software* GAMBIT versão 2.13.2. Esta etapa consiste dos seguintes passos:

1. Construção da geometria de interesse;
2. Definição das condições de contornos, diferenciando as regiões internas onde há escoamento dos contornos de superfície, cada um com seus respectivos nomes;
3. Refino das malhas;
4. Independência de malhas.

A Figura 3.13 apresenta o sistema de geração de malhas para ciclones. A imagem presente nesta figura corresponde à geometria de uma ciclone filtrante com malha estruturada.

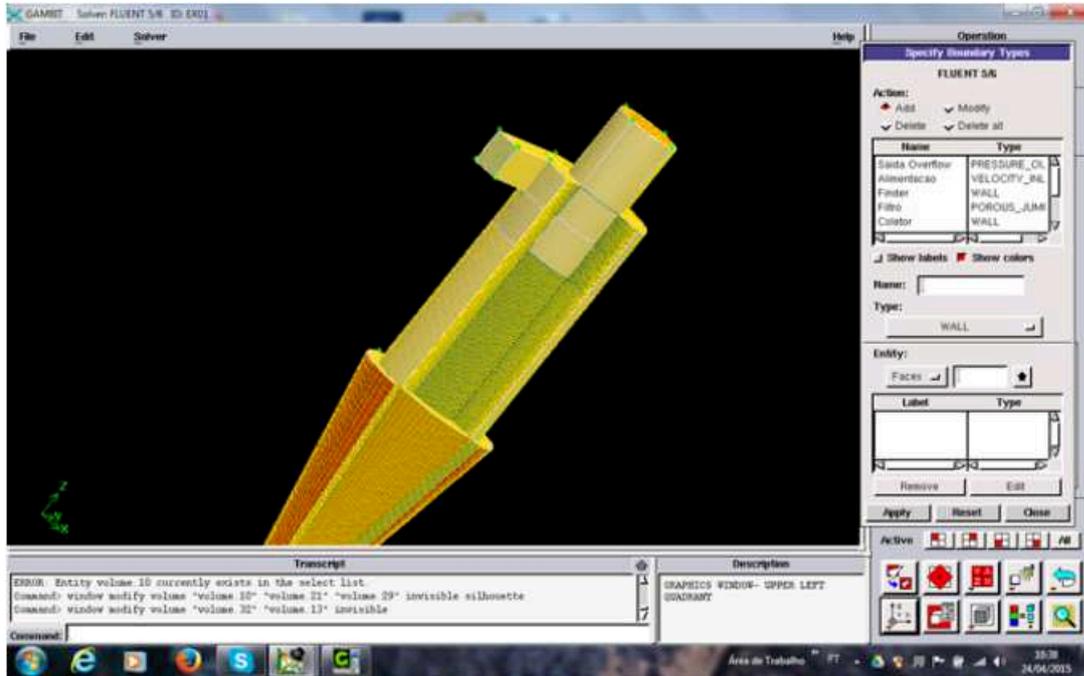


Figura 3.13: Sistema de geração de malhas para ciclones filtrantes.

As malhas 3D geradas a partir do GAMBIT são formadas por células hexaédricas totalmente estruturadas a fim de facilitar a simulação. As dimensões das geometrias estão dispostas na Tabela 3.2 e seguem a mesma conformação apresentada na Figura 3.4, modificando somente quanto ao comprimento da altura da entrada de alimentação, estabelecidos pelo planejamento dos experimentos numéricos.

Para geração da geometria e malhas para ciclones filtrantes, a presença do meio filtrante foi um complicador para o desenvolvimento desta. A estrutura do ciclone filtrante é semelhante àquela proposta para ciclones convencionais descrita por Wechel (2009). Entretanto, a superfície referente à região cônica em ciclone convencional é substituída por uma superfície que faz parte do interior do ciclone, com uma condição de contorno de meio poroso para escoamento unidirecional denominado *Porous Jump* que facilita a simulação em meios porosos para escoamentos unidirecionais. Na saída do filtro referente à seção cônica tem-se uma condição de pressão de saída, conforme apresentado na Figura 3.13.

3.2.5 Condições de Contornos

Com relação às condições de contornos, as Tabelas 3.4 e 3.5 apresentam as considerações para cada delimitação no domínio de cálculo.

Tabela 3.4: Condições de contorno nos ciclones Convencionais.

Área especificada	Condição de contorno
Entrada da alimentação	<i>Velocity Inlet</i>
Saída do <i>Overflow</i>	<i>Pressure outlet</i>
Parede rígidas do ciclone	<i>No Slip</i>

Tabela 3.5: Condições de contorno nos ciclones filtrantes.

Área especificada	Condição de contorno
Entrada da alimentação	<i>Velocity Inlet</i>
Saída do <i>Overflow</i>	<i>Pressure outlet</i>
Filtro	<i>Porus Jump</i>
Saída do filtro	<i>Pressure outlet</i>
Parede rígidas do ciclone	<i>No Slip</i>

Em relação à condição de contorno *Porous Jump* para ciclones filtrantes os valores de entrada, permeabilidade (α) e coeficiente de resistência inercial (C_2) foram determinados experimentalmente, a partir diversos valores de vazão volumétrica e queda de pressão através do meio filtrante.

3.2.6 Análise de Independência de Malhas

O estudo para análise de independência de malhas foi realizado em um ciclone Filtrante, utilizando o modelo de turbulência LES, para as quais os resultados estão dispostos na Tabela 3.6. Para isso, três níveis em quantidades de células foram testados, de forma a considerar que os resultados das simulações não apresentaria uma dependência significativa ao número de volumes de cada malha. Durante as simulações, foi utilizada uma velocidade na entrada da alimentação de 15 m/s, com um tempo de simulação de 2,0 s.

Tabela 3.6: Teste de independência de malhas.

Qualidade das malhas	Nº de Nó	Queda de Pressão (Pa)
Grosseira	600.000	240
Intermediária	800.000	225
Fina	900.000	215

Como critério de verificação para que fosse considerado a independência das malhas, foram avaliados os valores de queda de pressão no ciclone. Conforme apresentado na Tabela 3.6, verifica-se que os resultados computacionais nas três malhas foram menores

que 5% da malha intermediária para a malha fina, de modo que os resultados sobre a malha com 800.000 células já podem ser considerados como suficientemente precisos.

3.2.7 Configuração do *Solver*

Software Utilizado

Conforme apresentado na seção 2.4.7, o *software* comercial utilizado nas simulações foi o FUENT 14.0, com licença vitalícia pertencente à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQ). Mais detalhes sobre o *software* podem ser observados em Fluent (2011).

Modelos de Turbulência

A chave para sucesso em simulações via CFD em ciclones reside na descrição completa e precisa do comportamento turbulento do escoamento (GRIFFITHS; BOYSAN, 1996). Como discutido na seção 2.4.6, existe uma variedade de modelos de turbulência disponíveis no manual do *Software* utilizado (FLUENT, 2011). Entretanto, dado à complexidade do escoamento transiente, tridimensional e rotatório inerente a ciclones; os modelos mais utilizados são o modelo de tensões de *Reynolds* e o modelo em grande escalas. Portanto, para as simulações realizadas nesta tese, foram utilizados somente os modelos de turbulência RSM e LES.

A metodologia LES vem sendo utilizada em muitos trabalhos a fim de analisar o complexo comportamento fluidodinâmico em ciclones. Como exemplos, podem-se citar os trabalhos de Slack et al. (2000), Shalaby (2007), Derksen et al. (2008) e Elsayed e Lacor (2010). Nesta tese, com estratégia numérica, as simulações via LES começaram com o modelo de turbulência de tensões de Reynolds (RSM) para a inicialização do escoamento. Em seguida, após 10000 iterações após estabelecimento do campo de escoamento, foi aplicada a metodologia de simulação em grandes escalas (LES) utilizando o modelo submalha de *Smagorinsky*.

Escolhas dos Esquemas de Discretização

Com base nos trabalhos de Kaya e Karagoz (2008) e Shukla et al. (2011), que discutem as melhores configurações e seleção de esquemas numéricos, para que possam ser utilizados em simulações em ciclones, a seguir são apresentados os esquemas de discretização a serem utilizados na tese em relação ao modelo RSM:

- o esquema PRESTO foi utilizado para a interpolação de pressão;
- o algoritmo SIMPLEC para acoplamento de pressão velocidade;
- o esquema QUICK para as equações de quantidade de movimento;
- o esquema *second-order upwind* para a energia cinética turbulenta;
- o esquema de discretização *first-order upwind* para as equações das tensões de Reynolds.

Com base nos trabalhos desenvolvidos por Slack et al. (2000), Shukla et al. (2011), Elsayed (2011) que discutem o potencial do modelo LES na simulação em ciclones e no manual do FLUENT (FLUENT, 2011), a seguir são apresentados os esquemas de discretização a serem utilizados na tese em relação ao modelo LES:

- o esquema PRESTO foi utilizado para a interpolação de pressão;
- o algoritmo SIMPLEC para acoplamento de pressão velocidade;
- o esquema QUICK para as equações do momento;
- o esquema de discretização *bounded central difference scheme* para as equações das tensões de Reynolds (FLUENT, 2011).

Em ambos os modelos, para modelar a região de escoamento próxima às paredes, foi utilizada a função padrão.

Para as simulações em grande escalas, como estratégia de simulação, estas iniciaram no regime transiente, utilizando o modelo de turbulência RSM, com um passo no tempo de 1×10^{-4} para a inicialização do campo de escoamento. Posteriormente, com aproximadamente 10000 iterações, o modelo de turbulência foi alterado para o de grandes escalas, com um passo de tempo de 1×10^{-6} , utilizando o algoritmo de solução implícito segregado, conforme a proposição apresentada por Elsayed (2011), em sua tese de doutorado e atendendo recomendações do Fluent (2011) que apresenta e discute algumas sugestões para a definição do *time step*; sugerindo que para uma escolha correta do passo de tempo, ao final da simulação o número máximo de *Courant* deve ser inferior a 40.

Critério de Convergência

Em relação aos critérios de convergência, em primeiro lugar, uma solução converge quando todas as equações discretizadas atingem uma tolerância especificada. Em segundo

lugar, a solução numérica atingiu a convergência quando não há mais variação do resíduo com interação adicional. Em terceiro lugar, os balanços globais de massa, momento e energia e escalares devem ser obtidos. Durante o procedimento numérico, os valores dos resíduos devem ser monitorados ao longo de toda a simulação; portanto, para uma convergência satisfatória, os resíduos devem diminuir à medida que o processo numérico progride. Caso o contrário seja observado e o resíduo aumente, a solução numérica é classificada como sendo instável (divergente) (FLUENT, 2011).

A etapa de verificação da convergência é crucial no processo de simulação. É quando se avalia se a simulação atingiu ou não o seu fim. Em relação ao processo de convergência, observado nessa tese, dois aspectos foram considerados: primeiro, o resíduo deveria ser menor que 1×10^{-6} , como critério de convergência; em segundo, valores representativos de vazão mássica, de velocidade e de pressão foram monitorados em um ponto no interior do ciclone (meio do ciclone) e na saída do *overflow* até se tornarem constantes. Apesar da maioria das simulações atingirem suas respectivas convergências entre os tempos de 1,6 a 1,8 s, todas foram prolongadas em, no mínimo, até 2 segundos, para garantir a convergência.

Verificação dos Resultados

Para que uma solução via CFD seja válida é preciso que se avalie o desempenho quantitativamente. A verificação dos procedimentos é necessária para avaliar se a solução, via CFD, não apresentou uma dependência significativa com a malha utilizada (independência de malha) ou à convergência.

A verificação dos resultados numéricos, após uma certificação da independência de malhas satisfatória, foi realizada a partir da obtenção de dados experimentais e numéricos para os valores médios de queda de pressão com a velocidade de alimentação no ciclone filtrante.

CAPÍTULO 4

Análise dos Resultados

 ESTE CAPÍTULO são apresentados os principais resultados obtidos através dos ensaios experimentais e de modelagem computacional em ciclones do tipo convencional e do tipo filtrante. O capítulo é basicamente dividido em duas partes: (1) apresentação e discussão dos resultados experimentais no laboratório e (2) apresentação dos resultados numéricos. Os resultados experimentais serviram de base para realização de toda a experimentação numérica.

4.1 Resultados Experimentais em Laboratório

4.1.1 Determinação da Permeabilidade em Ciclone Filtrante

A determinação da permeabilidade, associada ao meio filtrante, foi um dos pontos chave do trabalho. Para determinação das permeabilidades, como mencionado na seção 3.1, foram utilizadas três metodologias diferentes; os resultados serão discutidos a seguir.

Avaliação da Metodologia 01 para Determinação da Permeabilidade do Meio Filtrante

Como dito anteriormente, esta metodologia consiste em determinar a permeabilidade do meio filtrante com seção normal ao sentido do fluxo de ar. A metodologia utilizada por

Rocha (2010), baseava-se em obter dados de velocidade superficial e de queda de pressão, a fim de que o ajuste de tais dados, às equações de Darcy (Equação 2.14) e de Forchheimer (Equação 2.15), possibilitassem determinação da permeabilidade.

Para determinar a velocidade superficial de filtração, foi considerada a área superficial do filtro plano. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram os ajustes aos resultados experimentais de queda de pressão com a velocidade superficial de filtração para as equações de Darcy e *Forchheimer* respectivamente. Na realização dos experimentos, estes foram realizados em triplicatas, aos quais os dados estão dispostos no Apêndice D.

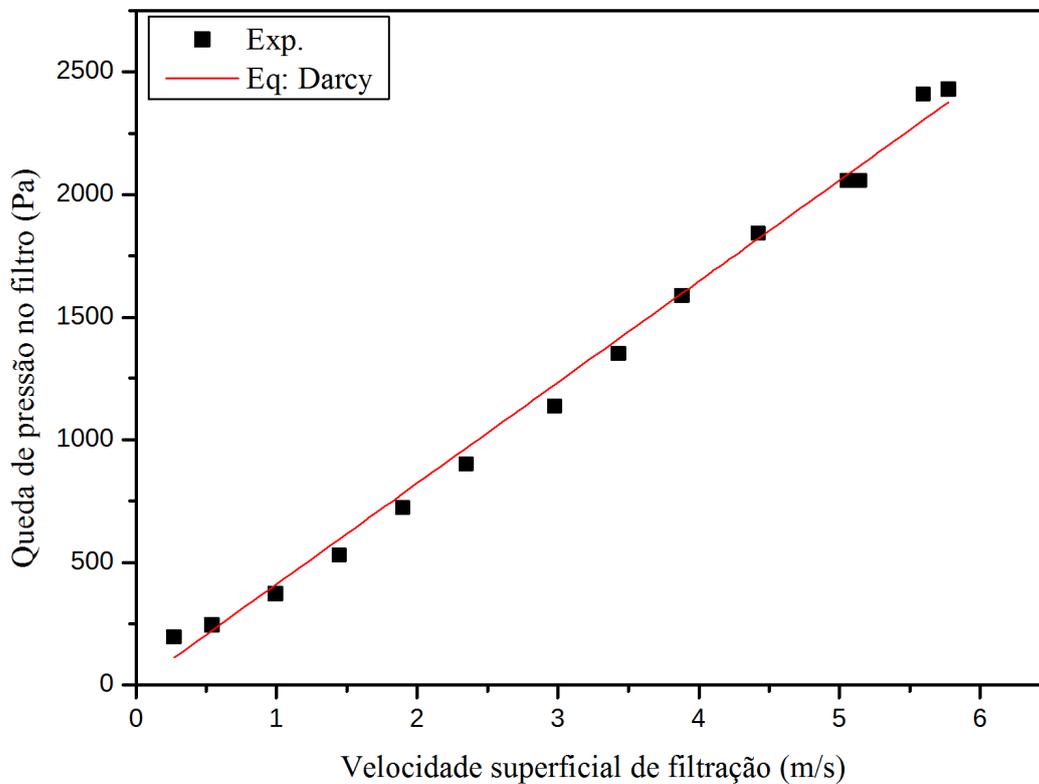


Figura 4.1: Análise da permeabilidade conforme Metodologia 01: equação de Darcy.

A avaliação dos resultados para determinação da permeabilidade, por meio de análise estatística, via a metodologia 01; consiste de uma amostra de dados aleatória com distribuição de erros tendendo para a normalidade quando o número de componentes é grande ($N(\eta, \sigma^2)$). Nota-se a partir das Figuras 4.1 e 4.2, que em ambos os casos, os dados experimentais ajustaram bem aos modelos propostos, uma vez que os coeficientes de correlação indicaram que cerca de 99,4% dos dados experimentais na Figura 4.1 e 99,7% dos resultados experimentais na Figura 4.2 puderam ser representados pelos modelos de

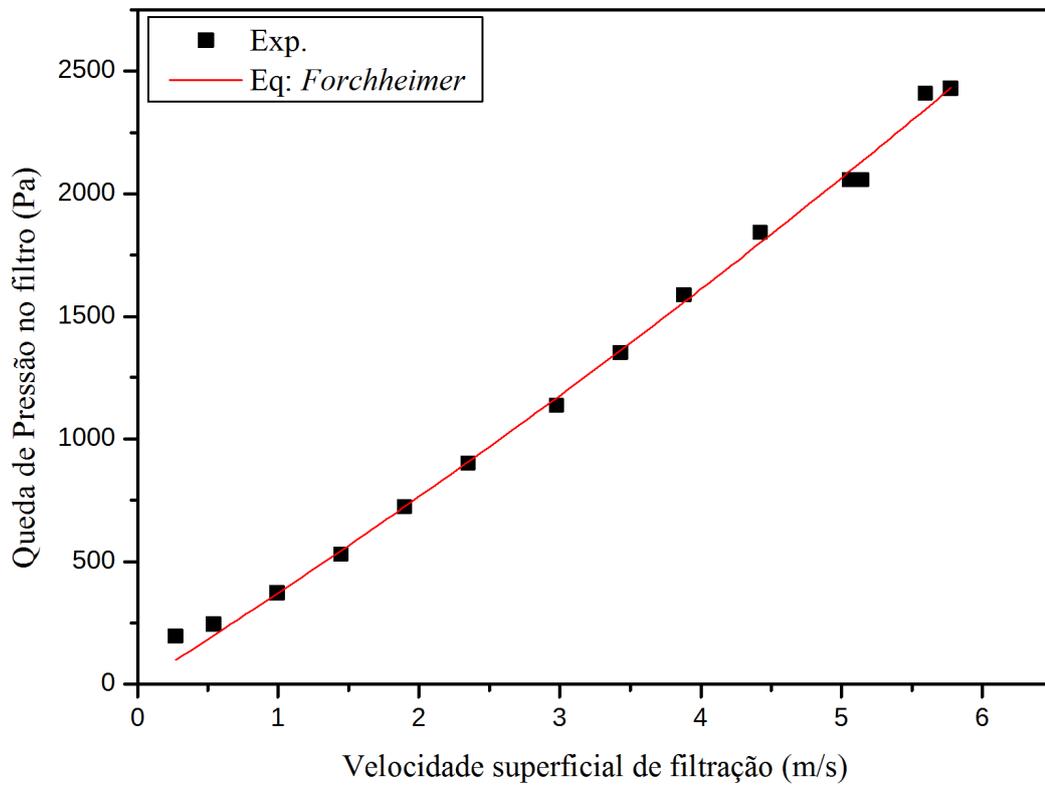


Figura 4.2: Análise da permeabilidade conforme Metodologia 01: equação de *Forchheimer*.

Darcy e *Forchheimer*, respectivamente.

A partir da Figura 4.1, conhecendo as propriedades físicas do ar (viscosidade e massa específica), espessura do meio filtrante e por analogia à equação de Darcy, foi possível determinar a permeabilidade (K) do ar no meio filtrante. A permeabilidade encontrada foi de $K = 8,54 \times 10^{-11} \text{ m}^2$.

A partir da Figura 4.2, conhecendo as propriedades físicas do ar (viscosidade massa específica), espessura do meio filtrante e fazendo analogia à equação de *Forchheimer*, foi possível determinar a permeabilidade (K) e a constante de resistência inercial C_2 , conforme sugere o Fluent (2011) utilizando uma equação análoga à equação de *Forchheimer*. A permeabilidade encontrada foi $K = 9,88 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ e o coeficiente de resistência inercial encontrado foi $C_2 = 1,48 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$.

Observando os valores encontrados de permeabilidade, verifica-se que tanto pelo modelo de Darcy, quanto pelo modelo de *Forchheimer*, os valores de permeabilidades são próximos; o que permite a estimativa da permeabilidade por qualquer um dos modelos.

Os valores da constante inercial (C_2) foram determinados somente pela equação de *Forchheimer*, entretanto, verifica-se que os efeitos cinéticos são mínimos, uma vez que o ajuste linear foi muito bom.

Avaliação da Metodologia 02 para Determinação da Permeabilidade do Meio Filtrante

A metodologia 02, para determinação da permeabilidade, é uma adaptação da metodologia utilizada por Rodrigues et al. (2003). Conforme apresentado na seção 3.1, esta metodologia consiste em determinar a permeabilidade no tronco do cone filtrante do ciclone, na própria unidade experimental. As tomadas de pressão no topo do cone e no seu ápice, possibilitaram determinar a queda de pressão no filtro, uma vez que este estava exposto à atmosfera.

Para determinação da velocidade superficial, foi tomada a mesma vazão de alimentação, uma vez que a saída do *overflow* não existia. Sendo assim, conhecendo a área plana do cone, normal ao sentido do escoamento, foi possível determinar a velocidade média de filtração para cada vazão de alimentação e conseqüentemente associada à queda de pressão no filtro.

As Figuras 4.3 e 4.4 ilustram os ajustes dos dados experimentais aos modelos propostos por Darcy e *Forchheimer*, respectivamente.

A análise dos resultados para determinação da permeabilidade, por meio de análise estatística, via a metodologia 02 consistiu de uma amostra de dados aleatória e que a distribuição de erros tende para a normalidade ($N(\eta, \sigma^2)$). O ajuste dos resultados experimentais aos modelos propostos indicaram coeficientes de correlação de 98,9% para os resultados experimentais da Figura 4.3 e de 99,7% para os dados experimentais da Figura 4.4, representando bem os modelos de Darcy e *Forchheimer* respectivamente. Entretanto, nota-se a partir das Figuras 4.3 e 4.4, que o ajuste aos resultados experimentais pelo modelo de *Forchheimer* apresentou melhor resultado.

Analisando a Figura 4.3, conhecendo as propriedades físicas do ar (viscosidade e massa específica), espessura do meio filtrante e por analogia à equação de Darcy, foi possível determinar a permeabilidade no meio filtrante. Portanto, a permeabilidade encontrada foi de $K = 4,95 \times 10^{-11} \text{ m}^2$.

A partir da Figura 4.4, conhecendo as propriedades físicas do ar (viscosidade e massa específica), espessura do meio filtrante e fazendo analogia à Equação 2.18, foi possível determinar a permeabilidade (K) e a constante de resistência inercial C_2 . Sendo assim, a permeabilidade encontrada foi $K = 5,77 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ e $C_2 = 3,19 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$.

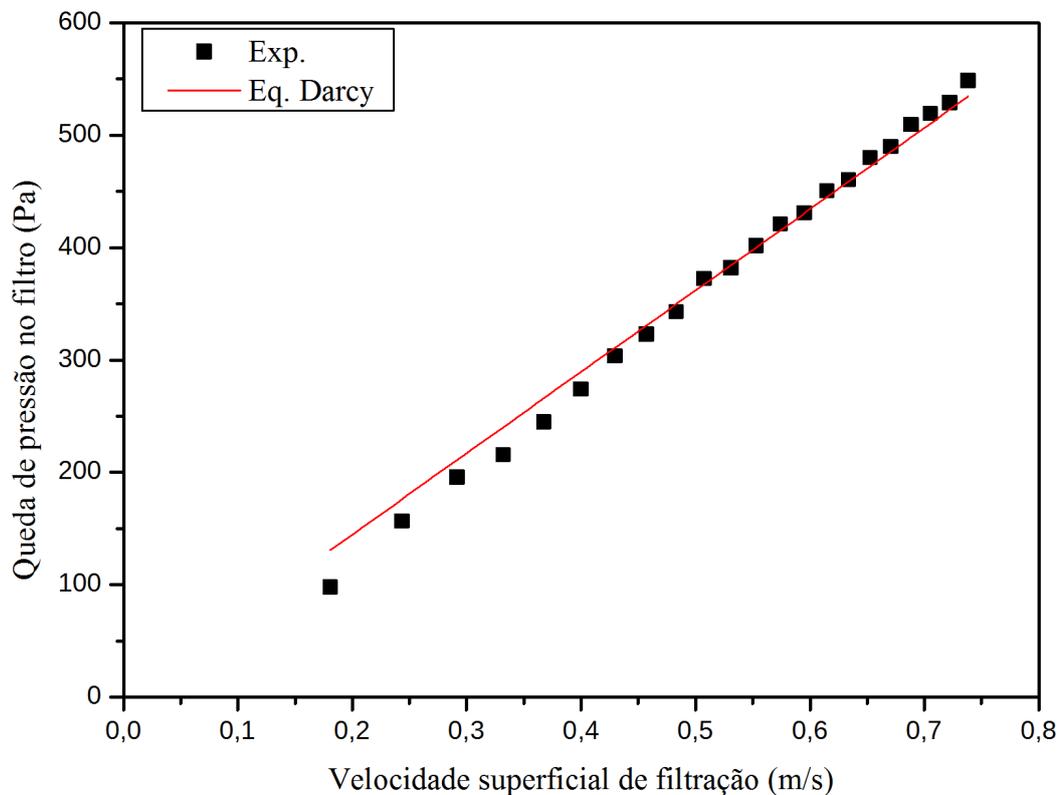


Figura 4.3: Análise da permeabilidade conforme equação de Darcy em área plana.

Ao observar os valores de permeabilidades obtidos, verifica-se que os valores obtidos pelo modelo linear de Darcy e pelo modelo quadrático de *Forchheimer* são próximos. Entretanto, para as análises feitas, cabe ressaltar que o escoamento foi normal à superfície do filtro e que o tipo de escoamento inerente a cada experimento realizado é diferente daquele observado em ciclone filtrante. A vedação da saída do *overflow* de alguma forma leva a modificação no tipo de escoamento. Para este caso, os efeitos característicos do escoamento rotatório na seção cônica não foram considerados.

Avaliação da Metodologia 03 para Determinação da Permeabilidade do Meio Filtrante

A fim de determinar a permeabilidade a partir de um escoamento que refletisse o real comportamento do processo de filtração no ciclone filtrante, esta tese propôs a metodologia 03. Esta metodologia baseia-se em determinar a permeabilidade no cone, considerando que parte da vazão de alimentação sai pelo filtro e o restante sai pela saída do *overflow*.

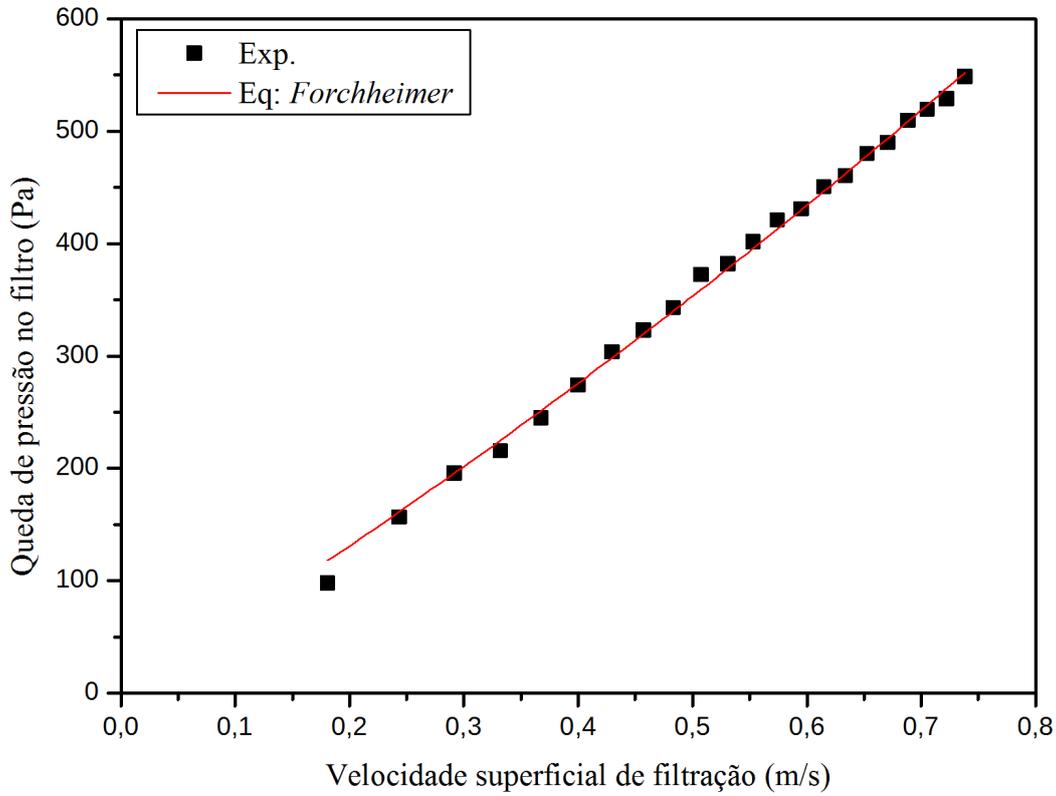


Figura 4.4: Análise da permeabilidade conforme Metodologia 02: equação de *Forchheimer*.

A metodologia 03 consistiu em desenvolver uma equação, em coordenada esféricas, a fim de avaliar, a partir dos resultados experimentais, o efeito geométrico da área de filtração sobre a permeabilidade do meio filtrante. O desenvolvimento para obtenção da Equação 4.1 é apresentado no apêndice C.

A partir de uma analogia à Equação 2.18, recomendada pelo manual do *software* solucionador utilizado o Fluent (2011), uma equação fenomenológica para a filtração em uma superfície cônica é gerada.

$$P_2 - P_1 = \left[\frac{\mu L}{\pi K \text{sen} \theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right] Q + \left[\frac{C_2 \rho L}{2\pi^2 \text{sen}^2 \theta} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) \right] Q^2 \quad (4.1)$$

Na Equação 4.1, P_2 e P_1 são as pressões estáticas no topo e no ápice do cone, respectivamente, μ é a viscosidade absoluta do ar, ρ é a massa específica do ar, θ é o ângulo do tronco do cone, R_2 e R_1 as geratrizes do tronco referentes ao topo e ao ápice, respectivamente, Q a vazão volumétrica de alimentação, K a permeabilidade do meio filtrante e C_2 a constante de resistência inercial.

Por analogia a equação quadrática 2.18, tem-se que K pode ser obtida pela Equação 4.2 e C_2 pela Equação 4.3. Sendo assim, os coeficientes associados aos termos quadrático (a) e linear (b), oriundos dos ajuste dos dados experimentais, apresentado na Figura 4.5; possibilitam a determinação da permeabilidade e do coeficiente de resistência inercial. A Figura 4.5 apresenta o perfil de queda de pressão no meio filtrante, conforme a vazão de filtrado.

$$K = \left[\frac{\mu L}{\pi b \text{sen} \theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \right] \quad (4.2)$$

$$C_2 = \left[\frac{2\pi^2 \text{sen}^2 \theta a}{\rho L \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right)} \right] \quad (4.3)$$

A análise dos resultados via a metodologia 03, para uma amostra aleatória e com distribuição normal, mostrou que o ajuste dos resultados experimentais à Equação 4.1 indicou um coeficiente de correlação de 99,9% para os dados experimentais da Figura 4.5, representando bem o modelo de *Forchheimer*.

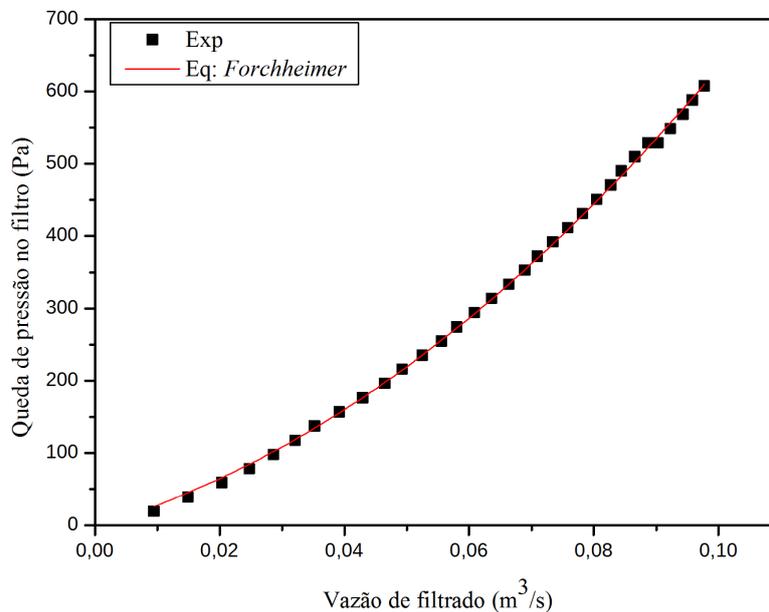


Figura 4.5: Análise da permeabilidade conforme Metodologia 03.

Os valores obtidos a partir da realização dessa metodologia foram: $C_2 = 1,49 \times 10^4 m^{-1}$ e $K = 12,9 \times 10^{-11} m^2$. Ao analisar a Tabela 4.1, verifica-se que o valor da permeabilidade foi superior quando determinado pela metodologia 03, na própria unidade experimental quando existia um fluxo de saída no *overflow*. Os resultados corroboram com

aqueles apresentados por Massarani (1985), ratificando que a geometria cônica (esférica) proporcionou uma maior capacidade de filtração, uma vez que apresentou um maior valor de permeabilidade quando analisado as metodologias propostas.

Tabela 4.1: Valores de Permeabilidade, conforme equação de *Forchheimer*.

Metodologia	Permeabilidade K (m ²)
01	$9,88 \times 10^{-11}$
02	$5,77 \times 10^{-11}$
03	$12,9 \times 10^{-11}$

Em relação aos efeitos cinéticos associados ao processo de filtração verifica-se que estes apresentam ordens de grandezas semelhantes. Ao analisar a Tabela 4.2, verifica-se que os valores dos coeficientes de resistência inercial via metodologias 01 e 03 são bem próximos e o C_2 associado à metodologia 2 foi o que apresentou maior valor. Portanto, com base nos resultados gerados, cabe inferir que os efeitos cinético referentes às três metodologia testadas, apresentam resistências semelhantes sobre o processo de filtração no meio filtrante utilizado.

Tabela 4.2: Valores Coeficiente inercial C_2 conforme equação de *Forchheimer*.

Metodologia	Coeficiente inercial C_2 (m ⁻¹)
01	$1,48 \times 10^4$
02	$3,19 \times 10^4$
03	$1,49 \times 10^4$

Como resultados das avaliações referentes às metodologias discutidas, verifica-se que a mais adequada para determinar a permeabilidade em ciclones filtrante foi a metodologia 03. Esta metodologia além de contemplar as características observadas no escoamento em ciclone, leva em consideração o efeito geométrico da área superficial na determinação da permeabilidade.

Os trabalhos anteriores, aos quais se determinaram a permeabilidade em ciclones filtrantes, apresentaram alguns pontos inconsistentes. No trabalho apresentado por Rodrigues (2001) verifica-se que a metodologia utilizada é imprópria uma vez que a queda de pressão no ciclone não corresponde à queda de pressão no filtro; além do escoamento com a vedação do *overflow* não ser aquele característico observado em ciclone filtrante. No trabalho de Lacerda (2007) verifica-se que as velocidades utilizadas para determinar a permeabilidade foi a velocidade de alimentação e não a velocidade superficial de filtração, associando estas à queda de pressão do ciclone e não no filtro, incorrendo de erros. A velocidade utilizada para obtenção da permeabilidade deve ser determinada á partir da

vazão volumétrica de filtrado e da área de filtração. Portanto, ciente que a determinação da permeabilidade é uma etapa primordial na simulação numérica, ratifica-se que a metodologia 03 deve ser utilizada na determinação da permeabilidade, uma vez que a área da superfície, associado ao escoamento rotatório, interfere nos valores da permeabilidade no tronco de cone filtrante.

4.1.2 Análise de Desempenho dos Ciclones Convencionais e Filtrantes

A análise do desempenho em ciclones convencionais e filtrantes foi realizada por meio da obtenção de resultados experimentais de eficiência global de coleta e de queda de pressão no ciclone. Conforme metodologias discriminadas na seção 3.1, são apresentados a seguir os resultados experimentais para ciclones convencionais e filtrantes.

Eficiência de Coleta em Ciclone Convencional

A fim de fazer um paralelo entre os resultados obtidos para ciclones filtrantes, foi determinada a eficiência em ciclone convencional. Nos experimentos, foi utilizada a magnesita como particulado, a uma vazão mássica de $0,005 \text{ kg/s}$, para análise da eficiência em ciclones. A Figura 4.6, apresenta os resultados de eficiência global de coleta, conforme a velocidade de alimentação no ciclone convencional.

Ao observar a Figura 4.6, verifica-se que a eficiência global de coleta para a magnesita atinge seu máximo a partir de uma velocidade de 15 m/s . Isto se deve ao diâmetro de corte com $172,38 \mu\text{m}$ da partícula na amostra ser elevado.

Eficiência de Coleta em Ciclone Filtrante

Semelhante ao ciclone convencional, foram realizados experimentos com o ciclone filtrante, avaliando a eficiência global de coleta. A Figura 4.7 ilustra o comportamento da eficiência global de coleta conforme a velocidade de alimentação. Na alimentação, foram injetadas partículas de Magnesita, a uma vazão mássica de $0,005 \text{ kg/s}$.

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.7, verifica-se que os valores médios de eficiência global de coleta para velocidades de alimentação acima de 16 m/s , se encontram em torno de 95% . Tais resultados, de alguma forma, refletem o que fora observado na Figura 4.6, para ciclone convencional, devido o elevado diâmetro de corte ($172,38 \mu\text{m}$). Entretanto, verifica-se que em mesmas faixas de velocidade de alimentação, a eficiência

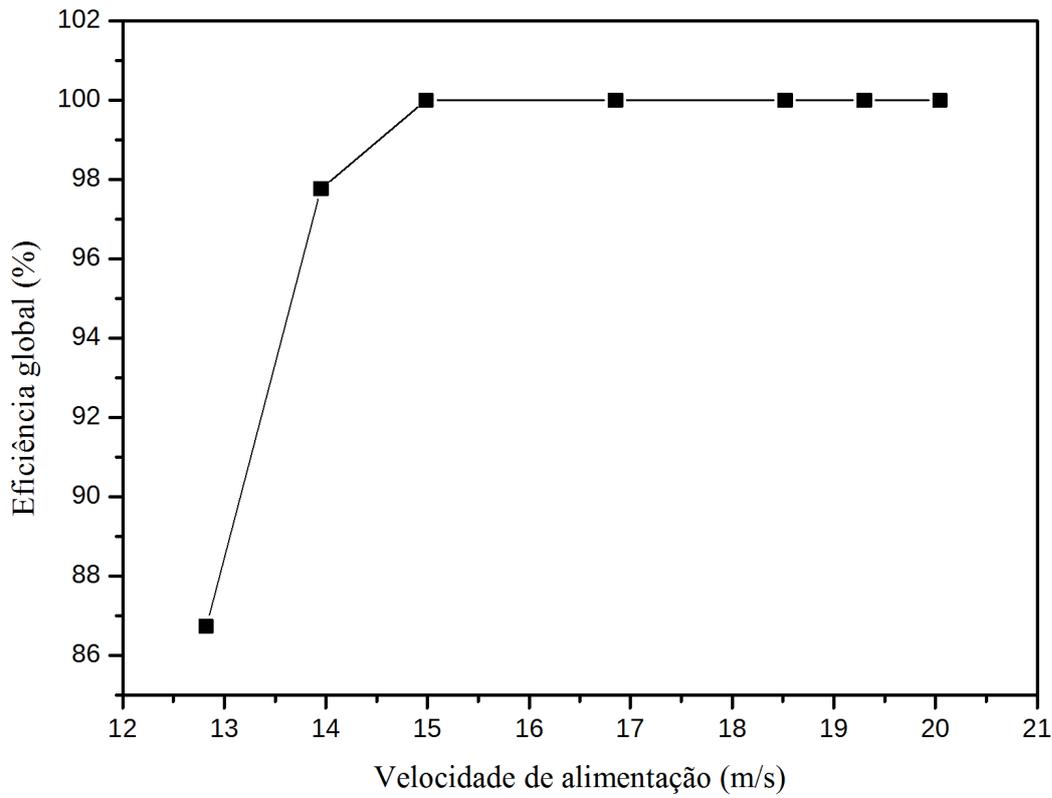


Figura 4.6: Eficiência global de coleta em ciclone Convencional.

global de coleta é levemente superior em ciclones convencionais, o que ratifica resultados apresentados por Rodrigues (2001).

A Figura 4.8 compara o desempenho dos ciclones convencionais e filtrantes em relação à eficiência global de coleta. Nesta figura, verifica-se que para uma menor velocidade (14 m/s), a diferença na eficiência entre os ciclones foi de 15%. A menor eficiência na modalidade filtrante possivelmente está associada a uma menor velocidade tangencial que provoca a diminuição da força de inércia e, por consequência, da eficiência de coleta. Entretanto, ao aumentar a velocidade de alimentação (para valores em torno de 20 m/s), pode-se notar que a diferença entre as eficiências globais na modalidade convencional e filtrante foi 5%. Portanto, verifica-se que em elevadas velocidades de alimentação, operando em elevadas vazões, a utilização da modalidade filtrante de ciclone deva ser levada em consideração, por associar elevadas capacidades de operação a custos reduzidos com uma boa eficiência de separação.

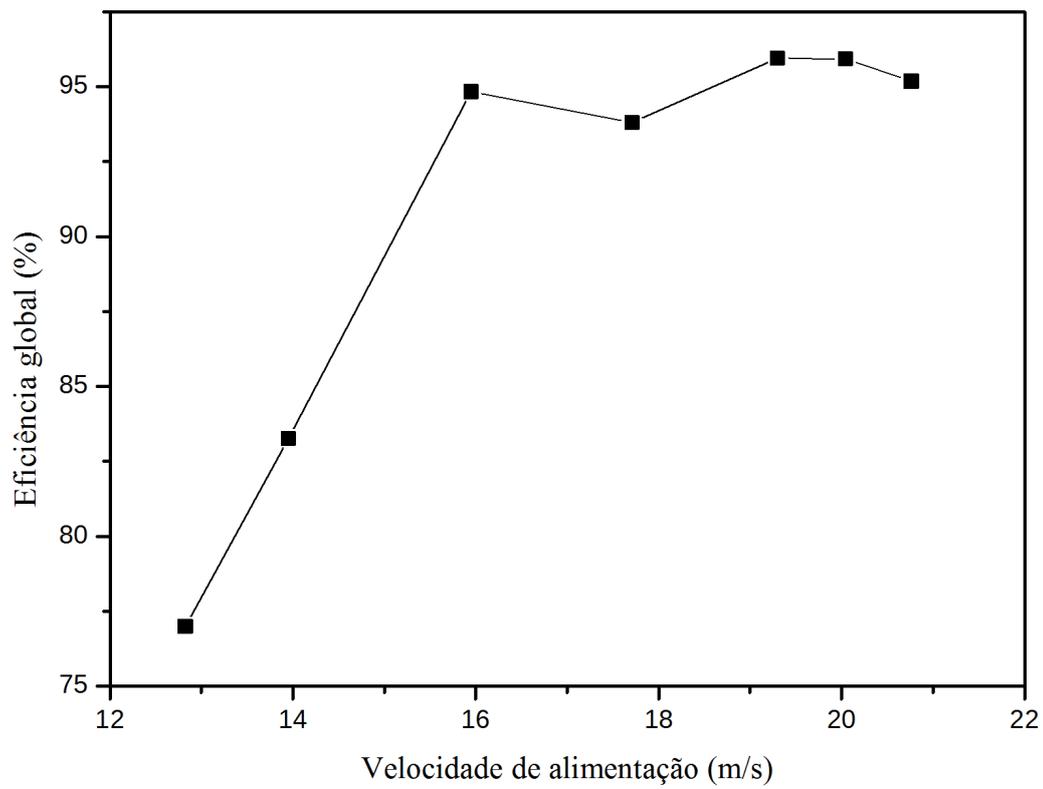


Figura 4.7: Eficiência global coleta em ciclone Filtrante.

Queda de Pressão em Ciclone Convencional

Como frisado anteriormente, a queda de pressão é o parâmetro de desempenho do ciclone, associado ao custo energético. Similar ao que fora realizado para eficiência, o mesmo foi feito para a queda de pressão. A Figura 4.9 apresenta os resultados de queda de pressão em ciclone convencional, com e sem o efeito de injeção de partículas.

Na Figura 4.9 verifica-se que há uma redução na queda de pressão, devido a injeção de partículas no ciclone convencional, o que foi observado a tempos por Yuu et al. (1978). Essa redução da queda de pressão, possivelmente está associada ao maior atrito, ocasionado pelas presença de partículas na parede do ciclone. O maior atrito, faz com que diminua a troca de quantidade de movimento na formação dos vórtices, diminuído assim a velocidade tangencial do fluido associada na entrada do *vortex finder*. A diminuição da velocidade tangencial na entrada do *vortex finder* faz com que a energia dissipada seja a mínima possível (HOFFMANN et al., 1992).

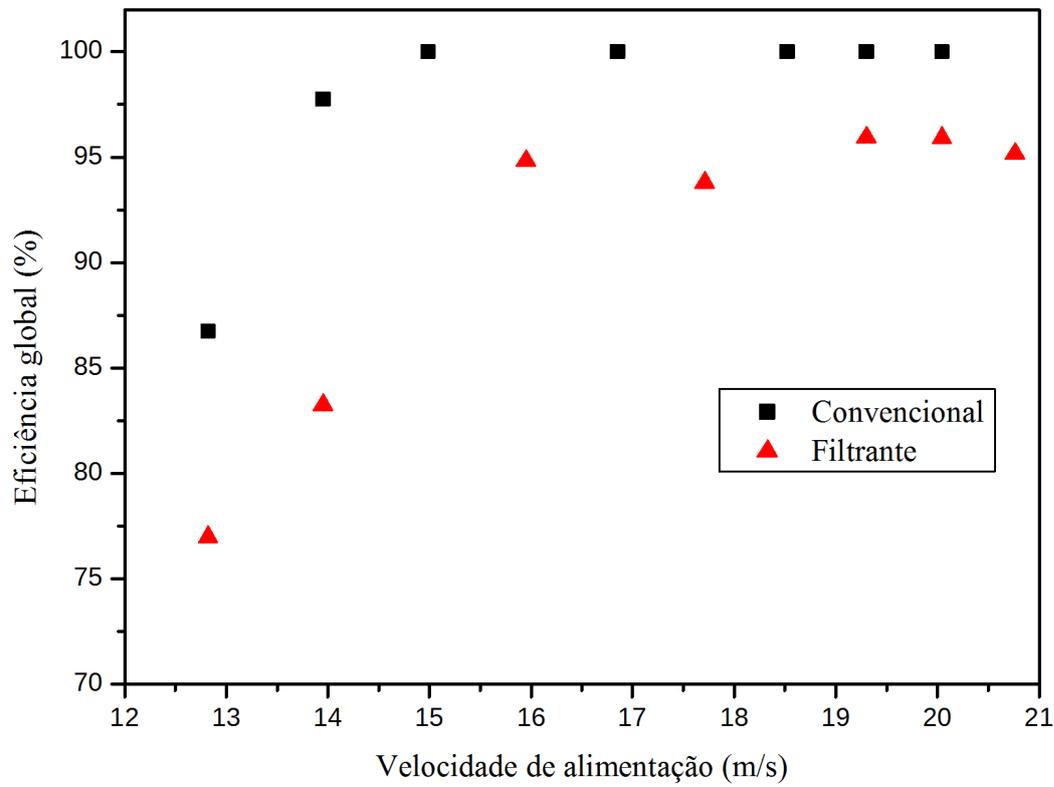


Figura 4.8: Eficiência global de coleta em ciclones convencional e Filtrante.

Queda de Pressão em Ciclone Filtrante

Uma das motivações para utilização do ciclone filtrante é capacidade de operação em elevadas vazões de operação a custo energético reduzido, ou seja a reduzidas quedas de pressão. Sendo assim, a Figura 4.10 ilustra os resultados experimentais de queda de pressão para ciclones filtrantes, com e sem injeção de particulados. Observa-se que há um acréscimo na queda de pressão conforme o aumento da velocidade de alimentação no ciclone.

Analisando a Figura 4.10 verifica-se que a injeção de partículas diminui drasticamente a queda de pressão no ciclone, com viés de diminuição maior ainda em elevadas velocidades de alimentação. O motivo possivelmente é aquele mesmo justificado para ciclone convencional. Entretanto, observou-se experimentalmente que durante um longo tempo de operação, com a saturação do filtro há uma salto na queda de pressão, aumentando drasticamente a pressão, o que indica a possibilidade de existência de filtração interna, uma vez que a deposição é reduzida devido as forças de cisalhamento.

Ao analisar as Figuras 4.9 e 4.10 verifica-se que para uma mesma velocidade de ali-

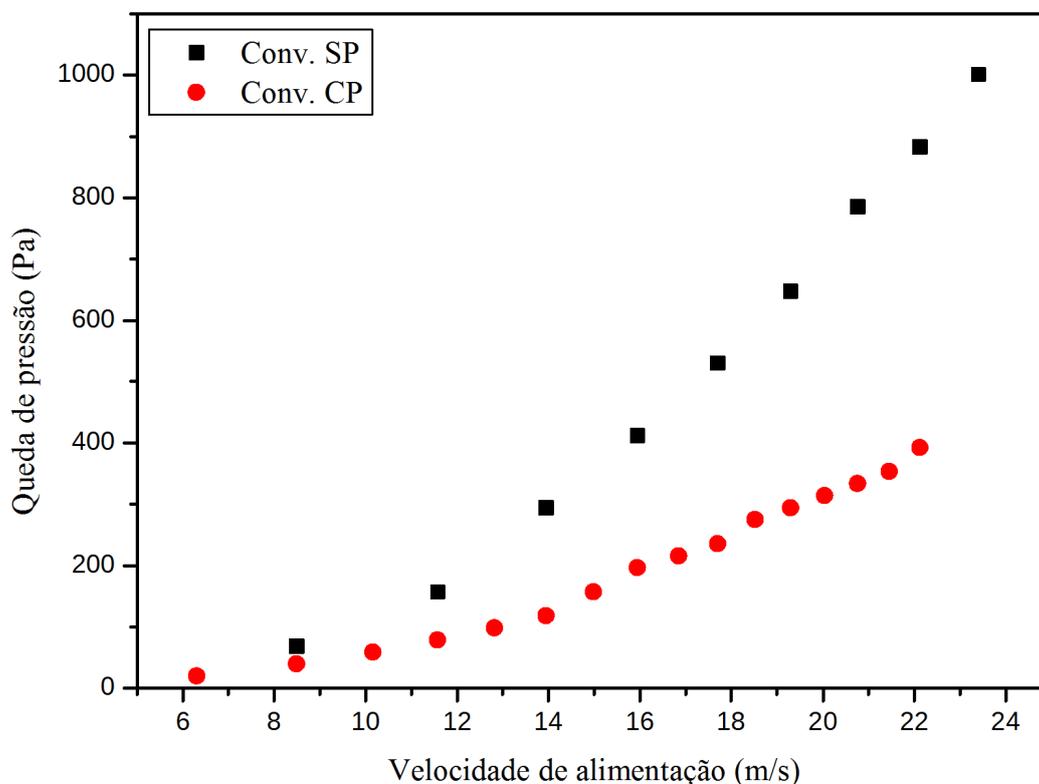


Figura 4.9: Queda de pressão em ciclone Convencional com e sem injeção de partículas.

mentação (14 m/s), o efeito da injeção de partículas foi mais sensível na modalidade convencional. Enquanto no filtrante ocasionou-se uma queda de pressão de 146 Pa, no convencional esta foi de 200 Pa. Possivelmente, a presença do meio filtrante proporcionou um menor atrito na parede da seção cônica, o que de certa forma viabilizou uma diminuição mais suave na queda de pressão do ciclone convencional ao adicionar particulado.

Uma das observações experimentais no trabalho foi o efeito do prolongamento da saída do overflow sobre a queda de pressão no ciclone filtrante. A presença de tal tubo, com o prolongamento da saída do *overflow*, favoreceu a formação de um escoamento estabelecido na saída. Verificou-se que a conexão não interferiu na diferença de pressão entre a alimentação e a saída do *overflow*, seja na presença de particulado ou não. Possivelmente, o aumento de pressão estática associado ao prolongamento do tubo foi compatível com a diminuição da pressão dinâmica associada ao escoamento rotatório. Tais resultados corroboram a afirmação de Hoffmann e Stein (2007). Segundo os autores, o prolongamento do duto de saída do overflow diminui o vórtice na saída do *overflow*.

Ao analisar a queda de pressão em ciclones convencional e filtrante sem injeção de partículas, verifica-se, que para elevadas velocidades de alimentação, o custo energético é

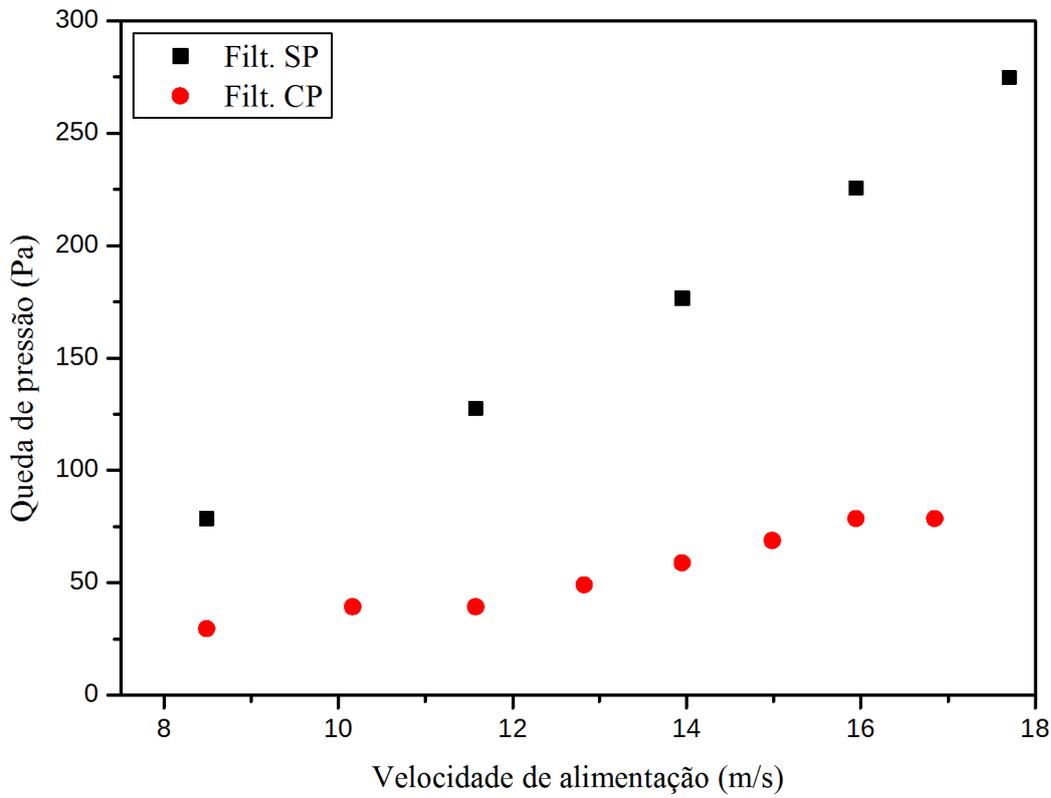


Figura 4.10: Queda de pressão em ciclone Filtrante.

menor para a modalidade filtrante de ciclone em relação ao convencional. Tal observação pode ser visualizada na Figura 4.11.

Nota-se na Figura 4.11 o efeito do meio filtrante sobre queda de pressão em ciclones filtrantes. Verifica-se que para velocidade menores (inferior a 12 m/s) as quedas de pressão em ciclones convencional e filtrante são bem próximas. Entretanto, em elevadas velocidades de alimentação a queda de pressão na modalidade filtrante é bem inferior.

Portanto, a menor queda de pressão nos ciclones filtrantes provavelmente está associada às menores parcelas de queda de pressão na região de separação e na saída do *vortex finder*. Com relação à região de separação, o menor atrito com a parede do meio filtrante diminui as quedas de pressão, além da presença do meio filtrante proporcionar a diminuição da troca de quantidade de movimento na formação dos vórtices interno e externo. Em relação às quedas de pressão na saída do *vortex finder*, estas são menores devido a diminuição da velocidade tangencial na presença do meio filtrante. Portanto, de maneira geral, a queda de pressão está associada à diminuição na intensidade do escoamento giratório no interior do ciclone filtrante.

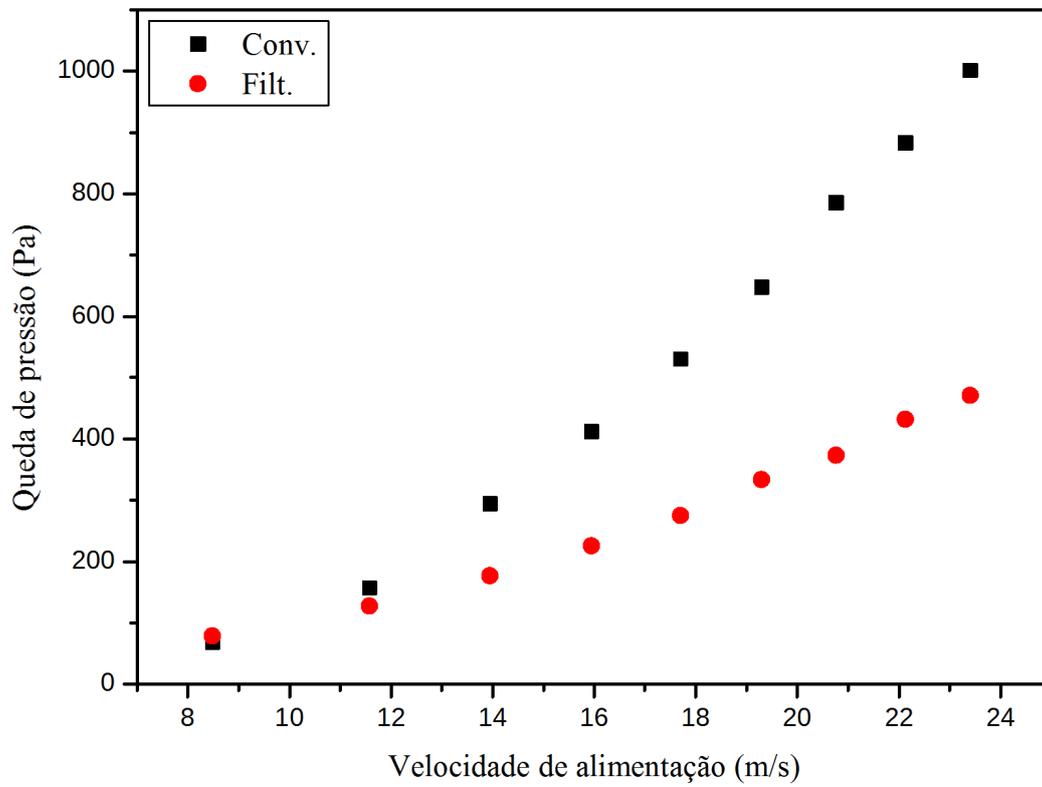


Figura 4.11: Queda de pressão em ciclones convencional e Filtrante.

4.2 Resultados Numéricos Experimentais

Os resultados apresentados nesta seção são oriundos das simulações com ciclones convencional e filtrante. As simulações tridimensionais, em regime transiente, visam averiguar o comportamento fluidodinâmico em ciclones filtrantes. Para as simulações, foram utilizados os modelos de turbulência RSM e LES, sendo que somente o segundo fora utilizado em ciclones filtrantes devido aos melhores resultados obtidos quanto à previsibilidade dos contornos de velocidades axial e tangencial.

Os resultados experimentais numéricos foram realizados conforme planejamento composto central apresentado na Tabela 4.3. Nessa tabela, são apresentados as variáveis independentes codificadas e não codificadas referentes à altura da alimentação (a), a vazão volumétrica de alimentação (Q) e a permeabilidade do meio filtrante (K). Como variáveis dependentes, têm-se o número de Euler (E_u) e a razão de filtrado (R_f).

Tabela 4.3: Matriz do Planejamento Experimental

Variáveis codificadas				Variáveis não codificadas			Variáveis Resposta	
Experimento	X_1	X_2	X_3	a (m)	Q (m^3/s)	K (m^2)	E_u	R_f
1	-1	-1	-1	0,057	0,04	$1,00 \times 10^{-11}$	6,38	0,60
2	-1	-1	+1	0,057	0,04	$5,00 \times 10^{-11}$	2,24	0,79
3	-1	+1	-1	0,057	0,08	$1,00 \times 10^{-11}$	3,27	0,55
4	-1	+1	+1	0,057	0,08	$5,00 \times 10^{-11}$	1,63	0,93
5	+1	-1	-1	0,133	0,04	$1,00 \times 10^{-11}$	8,39	0,17
6	+1	-1	+1	0,133	0,04	$5,00 \times 10^{-11}$	6,22	0,56
7	+1	+1	-1	0,133	0,08	$1,00 \times 10^{-11}$	4,76	0,17
8	+1	+1	+1	0,133	0,08	$5,00 \times 10^{-11}$	5,02	0,78
9	$-\alpha$	0	0	0,041	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$	1,54	0,83
10	$+\alpha$	0	0	0,149	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$	7,69	0,53
11	0	$-\alpha$	0	0,095	0,032	$3,00 \times 10^{-11}$	5,43	0,46
12	0	$+\alpha$	0	0,095	0,088	$3,00 \times 10^{-11}$	3,93	0,76
13	0	0	$-\alpha$	0,095	0,06	$1,72 \times 10^{-12}$	5,79	0,05
14	0	0	$+\alpha$	0,095	0,06	$5,83 \times 10^{-11}$	3,47	0,83
15	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$	4,55	0,66
16	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$	4,55	0,66
17	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$	4,55	0,66
18	0	0	0	0,095	0,06	$3,00 \times 10^{-11}$	4,55	0,66

4.2.1 Geração das Malhas de Ciclones

Como enfatizado na seção 2.4.2, a escolha dos tipos e a construção das malhas é uma das etapas primordiais da simulação. As características da malha influencia diretamente na precisão dos resultados e no tempo de simulação. Portanto, em se tratando de ciclones filtrantes, para simulações tridimensionais, a geração de malhas foi uma das etapas determinantes durante as simulações.

Geração das Malhas de Ciclones Convencionais

Quanto à geração de malhas para ciclone convencional, esta etapa foi relativamente simples, uma vez que na literatura, encontram-se trabalhos que servem de referência (WECCEL, 2009; DIAS, 2009). Um exemplo de geometrias e malhas em ciclones convencionais é apresentado na Figura 4.12.

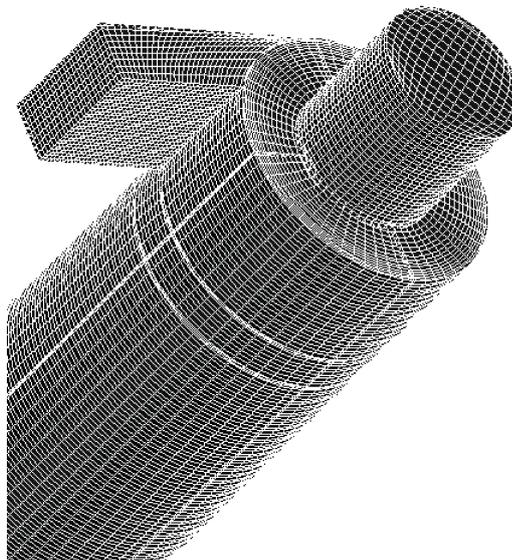


Figura 4.12: Malhas em Ciclone Convencional.

Geração das Malhas de Ciclones Filtrantes

Em se tratando de ciclones filtrantes em 3D, a geração das malhas foi uma etapa complexa. Não tendo referencial algum, que orientasse na elaboração da malha, vários tipos e configurações de malhas foram testadas. A complexidade da malha, na modalidade filtrante, está associada à presença de um meio poroso. Para isso, foi elaborada uma malha, conforme Figura 4.13, que contemplava uma camada interna ao volume, com uma condição de contorno características de um meio filtrante, como apresentadas na seção 3.2.

4.2.2 Experimentos de Verificação Numérica

Para verificação numérica foram realizados experimentos em laboratório. A avaliação dos resultados numéricos foi realizada correlacionando os com dados experimentais. A Figura 4.14 apresenta os valores médios de queda de pressão no ciclone filtrante em função da velocidade de alimentação no ciclone filtrante. O desvio apresentado entre os valores numéricos e experimentais ficaram em torno de 2%. Os dados numéricos, foram obtidos utilizando o modelo de turbulência LES.

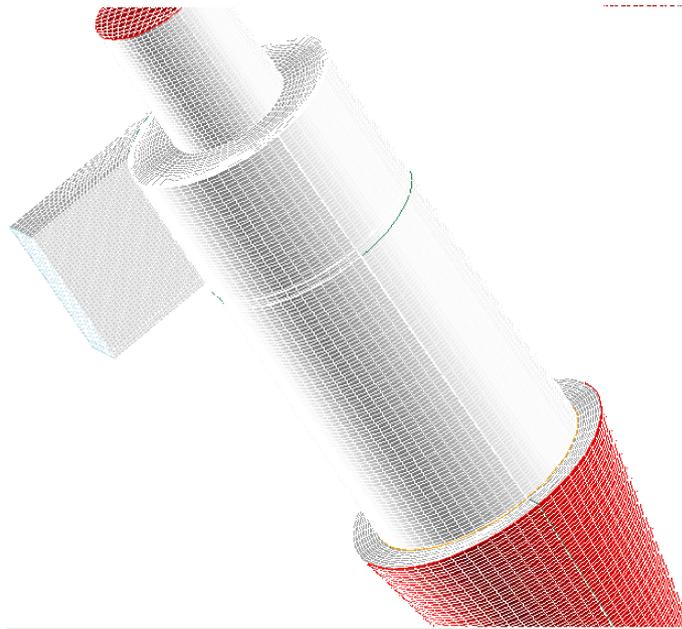


Figura 4.13: Malhas em Ciclone Filtrante.

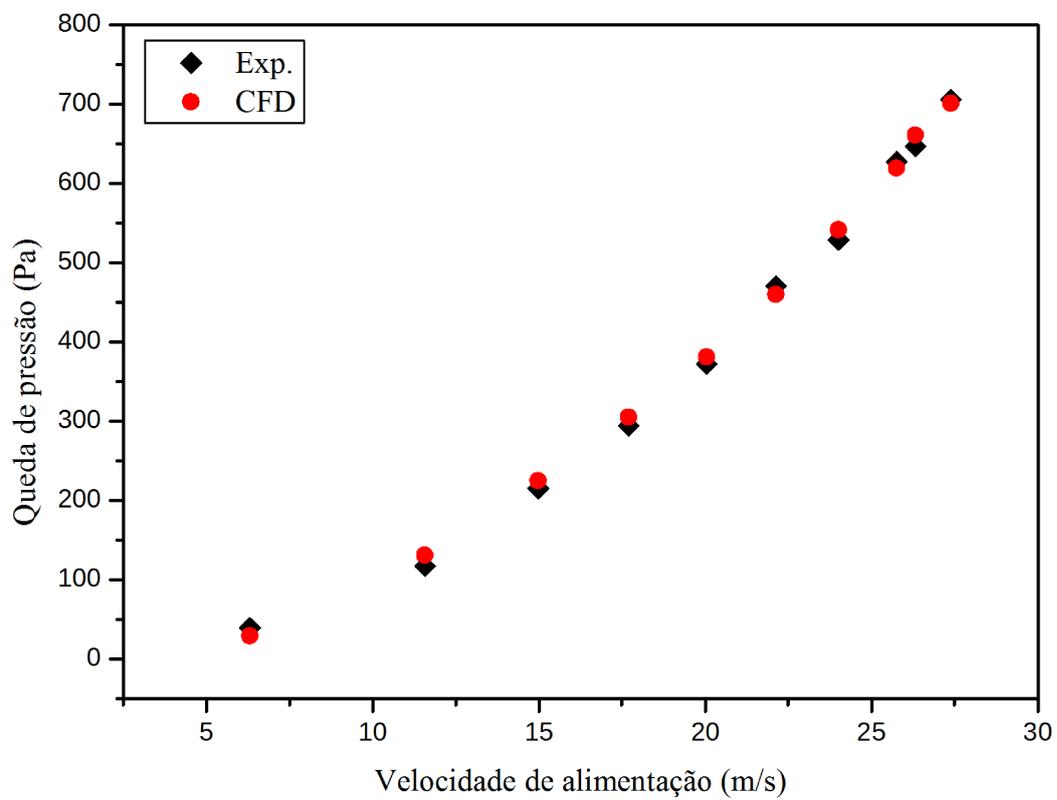


Figura 4.14: Verificação numérica dos resultados experimentais.

4.2.3 Comportamento Fluidodinâmico em Ciclone Convencional

O comportamento em ciclone convencional é bem característico devido à formação dos vórtices interno e externo com uma diminuição na região central do ciclone. Os perfis de pressão e de velocidades tangenciais e axiais são bem definidos, conforme já fora apresentado por Leith et al. (1984).

Dada a configuração do ciclone convencional utilizado nesta tese, os contornos de pressão, velocidade tangencial e velocidade axial são apresentados na Figura 4.15.

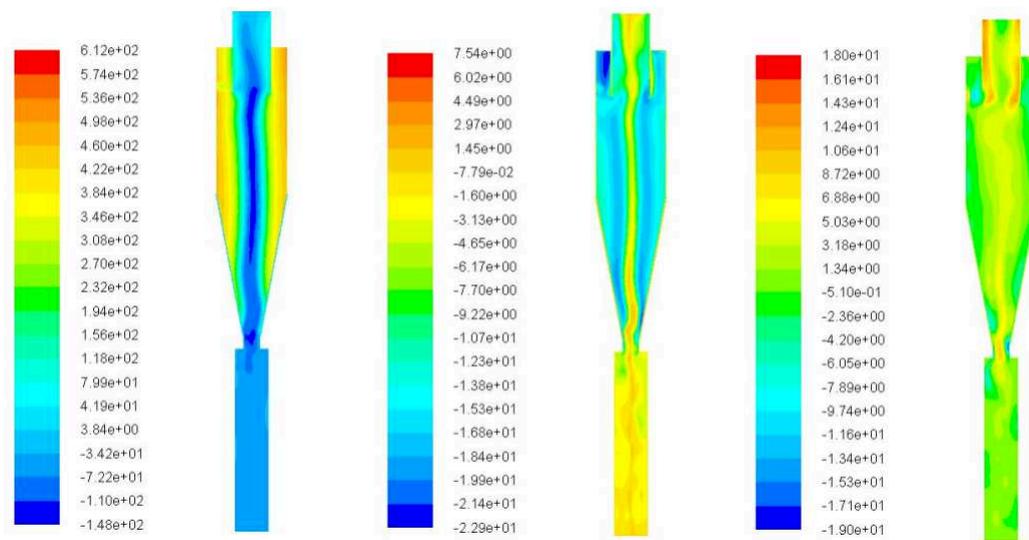


Figura 4.15: Os gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$. Da esquerda para a direita: a pressão estática (N/m^2), a velocidade tangencial (m/s) e a velocidade axial (m/s). Do topo a até o coletor do ciclone.

Quanto aos contornos de pressão, verifica-se, a partir da Figura 4.15 que a pressão diminui radialmente da parede para o centro do ciclone, apresentando uma pressão máxima próximo à parede. A pressão diminui até a posição radial correspondente ao raio do *vortex finder*. Em distância radial menor, a formação do duplo vórtice faz com que gere um vácuo na região central do ciclone. A região de pressão negativa está associada a existência do vórtice forçado, devido à elevada velocidade angular. O gradiente de pressão é maior ao longo da direção radial, diferentemente do gradiente axial de pressão que é baixo. Dada as circunstâncias, o escoamento ciclônico, é um escoamento assimétrico, podendo ser confirmado a partir da forma dos contornos de pressão na região central do ciclone.

Quanto aos contornos de velocidade tangencial, o comportamento é similar ao perfil de Rankine (HOFFMANN; STEIN, 2007). Os valores de velocidade tangencial aumentam, da parede para o centro, tendo um máximo, na posição radial correspondente ao raio do *vortex finder*.

Quanto à velocidade axial, verifica-se uma velocidade descendente próximo à parede e uma velocidade ascendente próximo à região central. A partir dos contornos de velocidade verifica-se a existência de *Processing Vortex Core* (PVC) na região central do ciclone.

4.2.4 Comportamento Fluidodinâmico em Ciclone Filtrante

O comportamento em ciclone filtrante é similar àquele encontrado em ciclone convencional em relação aos contornos de pressão e velocidade. Os gráficos de contornos para o ciclone filtrante, para os experimentos executados são apresentados no apêndice E. Para um tempo médio na seção $Y=0$, da esquerda para a direita: a pressão estática, a velocidade tangencial e a velocidade axial são apresentados na figura 4.16. Entretanto, nota-se que a presença de uma saída adicional no filtro provoca perturbações significativas nos contornos de pressão e, principalmente, nos de velocidades axial e tangencial.

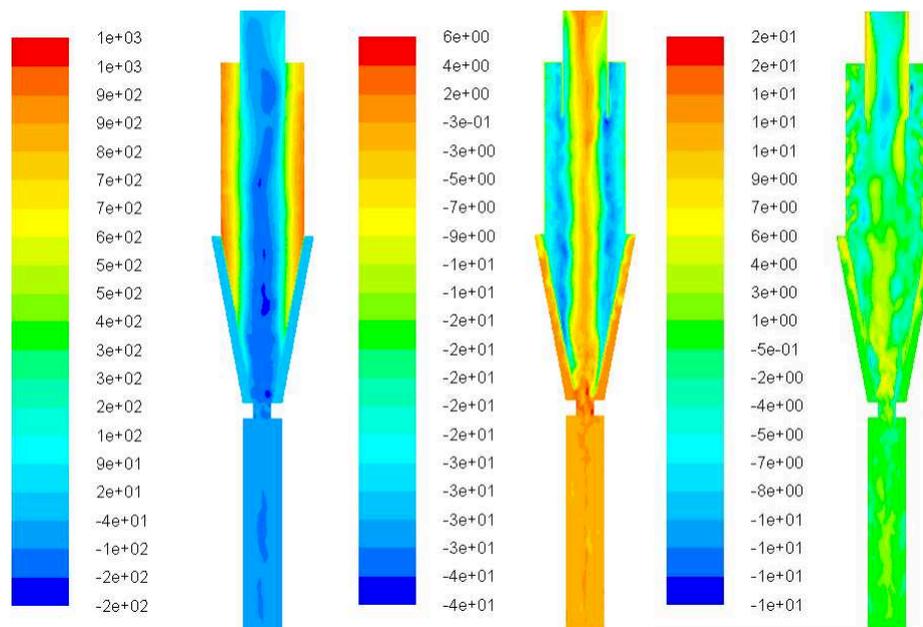


Figura 4.16: Os gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$. Da esquerda para a direita: a pressão estática (N/m^2), a velocidade tangencial (m/s) e a velocidade axial (m/s). Do topo até o coletor do ciclone.

A formação do duplo vórtice em ciclone filtrante sofre influência significativa da permeabilidade do meio filtrante. As figuras apresentadas no apêndice F, mostram como a presença do filtro, a depender dos valores da permeabilidade, modificam de certa forma os perfis característicos de velocidades axial e tangencial.

Em relação aos contornos de pressão apresentados no apêndice E, o ponto chave foi o valor da permeabilidade atribuída ao meio filtrante. Para valores de permeabilidade superiores a 1×10^{-10} , verificou-se previamente a não formação do duplo vórtice, sendo

estes formados somente para permeabilidades com valores inferiores ao valor apresentado. O efeito direto de se diminuir os valores de permeabilidade é o aumento significativo da velocidade tangencial, que conseqüentemente leva a uma maior eficiência de coleta devido o efeito da força de inércia. Portanto, o aumento da permeabilidade reduz a queda de pressão, em contrapartida pode reduzir a eficiência de coleta.

4.2.5 Análise das Variáveis em Ciclones Filtrantes

Para realização das análises referentes a significância de cada variável resposta, foram utilizados quadro de ANOVA, diagramas de Pareto e gráficos de superfície de resposta. As técnicas estatísticas utilizadas ajudaram discernir quais variáveis teriam efeitos sobre o número de Euler e sobre a Razão de filtrado no ciclone filtrante.

Em relação aos números de Euler, foi utilizada a equação clássica da mecânica dos fluidos que relaciona a velocidade na alimentação e a queda de pressão no ciclone, para um regime turbulento estabelecido, conforme apresenta a Equação 4.4, que segundo Hoffmann e Stein (2007) é mais popular entre os projetistas de equipamento. A utilização da Equação 4.4 gerou resultados estatísticos satisfatórios, uma vez que a amostra de dados é aleatória e que a distribuição de erros tende para a normalidade ($N(\eta, \sigma^2)$).

$$Eu = \frac{-2\Delta P}{\rho v_e^2} \quad (4.4)$$

Efeitos das Variáveis sobre o Número de Euler (Eu)

A análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 4.4 mostra que o modelo representa a variabilidade dos resultados experimentais com $R^2 = 0,95595$; o que significa dizer que o modelo proposto foi adequado para descrever a influência das variáveis independentes em relação ao número de Euler.

A fim de visualizar o comportamento das variáveis no espaço amostral, diagramas de Pareto e gráficos de superfícies respostas foram elaborados. O diagrama de Pareto, representado pela Figura 4.17, ilustra graficamente a importância de cada fator em relação ao número de Euler. O diagrama de Pareto é um histograma de frequência em que o comprimento de cada barra está associado ao efeito estimado da variável. A linha vertical no diagrama de Pareto delimita o início das variáveis que apresentam um grau de significância maior ou igual a 95% e que são estatisticamente significativas

Baseando no diagrama de Pareto na Figura 4.17 e na tabela de Anova da Tabela 4.4,

Tabela 4.4: Análise de variância (ANOVA) e Coeficientes de regressão para Eu

Variável	Coeficiente de regressão	Valor de F	Valor de P
β_0	4,535898		
Linear			
β_1	1,630383	97,85412	0,000009
β_2	-0,889974	29,15776	0,000646
β_3	-0,914821	30,80857	0,000541
Quadrático			
β_{11}	0,051368	0,06476	0,805548
β_{22}	0,082844	0,16843	0,692279
β_{33}	0,058392	0,08368	0,779729
Interação			
β_{12}	-0,137841	0,46630	0,513979
β_{13}	0,484276	5,75565	0,043238
β_{23}	0,614424	9,26498	0,015970
R^2	0,95595		

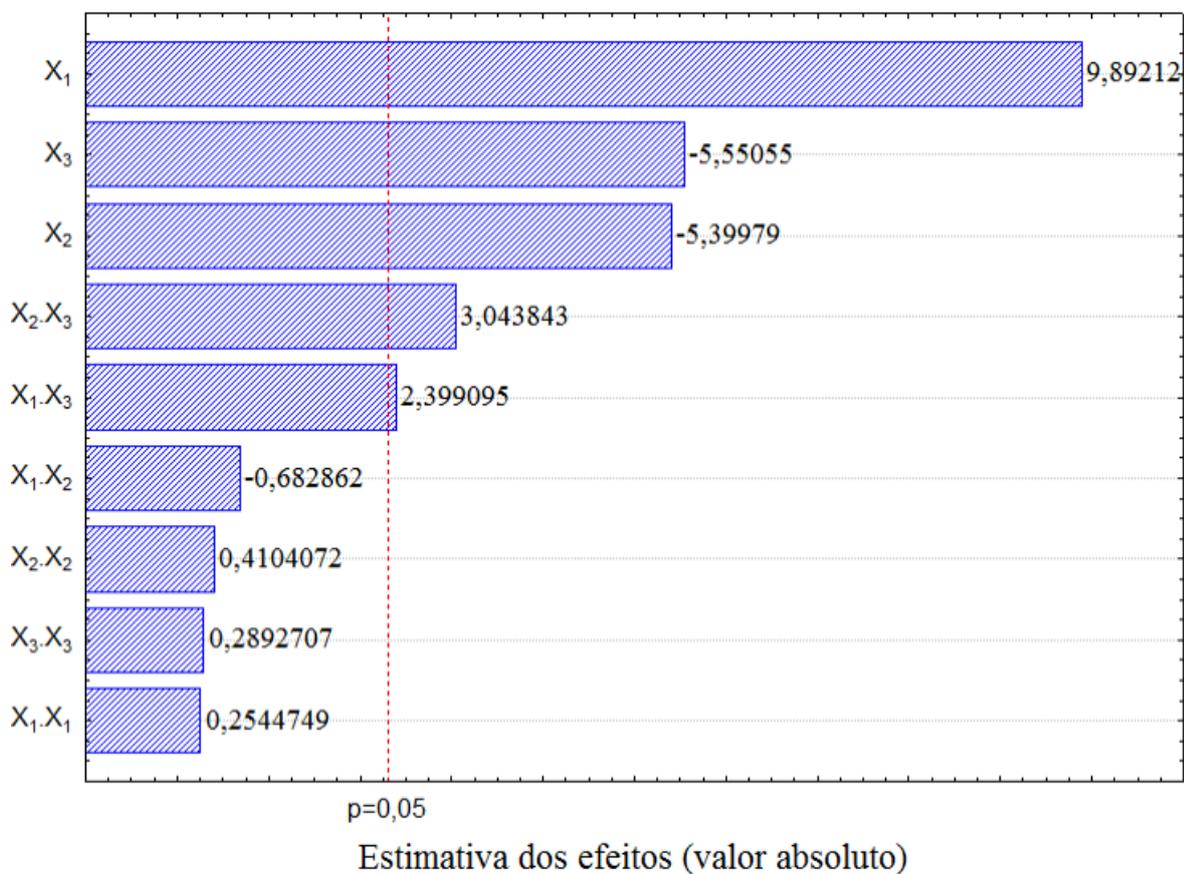


Figura 4.17: Diagrama de Pareto para a variável Eu.

nota-se que existem três fatores significantes e efeitos de interações, com nível de confiança de 95% : a permeabilidade; a altura da alimentação; a vazão volumétrica de alimentação, a interação entre a vazão e a permeabilidade e interação entre a altura da alimentação e

a permeabilidade do meio filtrante. Ao observar o diagrama de Pareto na Figura 4.17, verifica-se efeitos antagônicos da variável altura da alimentação em relação as outras duas variáveis, ou seja, o número de Euler aumenta com a elevação da altura e diminui com o aumento das outras variáveis.

Em relação às variáveis analisadas, a variável mais significativa foi o comprimento da altura da alimentação. O aumento da dimensão da alimentação eleva E_u devido a diminuição da velocidade na seção entrada, entretanto, a depender da velocidade tangencial na saída do *vortex finder*, o valor de E_u pode diminuir a depender da queda de pressão.

Para visualizar o efeito das variáveis significativas sobre o número de E_u , superfícies de respostas do modelo foram geradas, variando duas das variáveis, dentro da faixa experimental, tomando os demais valores das variáveis no ponto central. A Figura 4.18 foi gerada variando a vazão de alimentação e altura da alimentação sem efeito de interação entre as variáveis. O comportamento da curva é linear com efeito preponderante da dimensão da alimentação, que apresenta maior sensibilidade, conforme ratificado pela diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.17. Portanto, a região de menores números de Euler estão associadas ao aumento da vazão de alimentação com diminuição da altura da alimentação, uma vez que ambos aumentam a velocidade de entrada do ciclone. O comportamento da variável resposta em relação aos termos independentes, considerando somente os termos significativos é apresentado na Equação 4.5.

$$E_u = 4,66 + 1,63X_1 - 0,89X_2 \quad (4.5)$$

A Figura 4.19 foi gerada variando a permeabilidade e a altura da alimentação em suas formas codificadas. O comportamento da curva é não linear devido ao efeito de interação das duas variáveis. Neste caso, verifica-se que o efeito da dimensão da alimentação é preponderante em relação aos efeitos de interação e da permeabilidade que apresentam valores similares para os respectivos coeficientes, conforme ratificado pela diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.17. Portanto, os menores valores de E_u são obtidos a partir dos maiores valores de permeabilidades associados a menores valores comprimentos da altura da alimentação. Isto se deve ao efeito da altura sobre a velocidade de entrada (diminuindo) e da permeabilidade sobre a queda de pressão (diminuindo). O comportamento da variável resposta em relação aos termos independentes, considerando somente os termos significativos é apresentado na Equação 4.6

$$E_u = 4,66 + 1,63X_1 - 0,91X_3 + 0,48X_1X_3 \quad (4.6)$$

A Figura 4.20 foi gerada variando a vazão de alimentação e a permeabilidade do meio

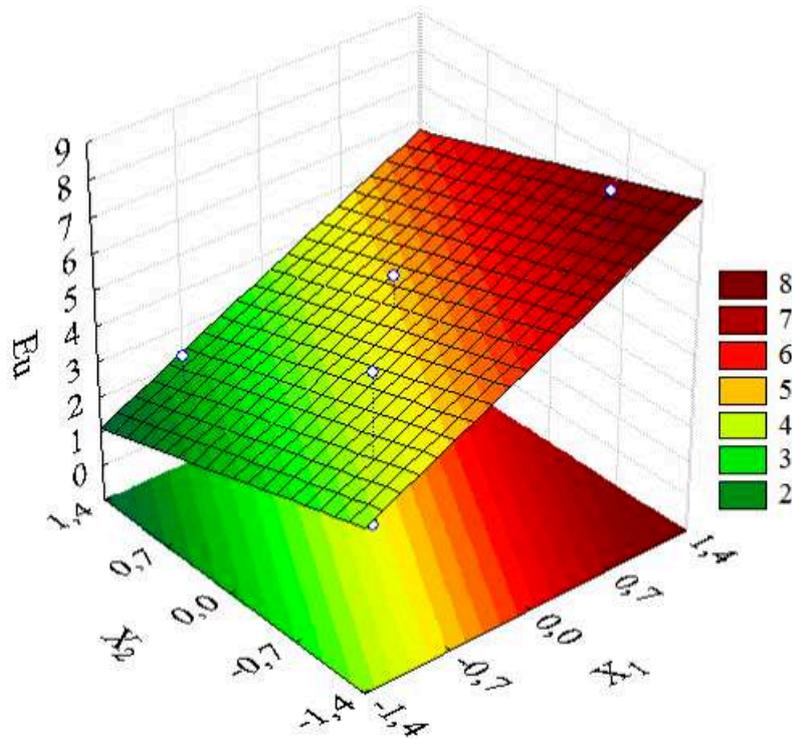


Figura 4.18: Superfície de resposta para Eu em função de X_1 e X_2 .

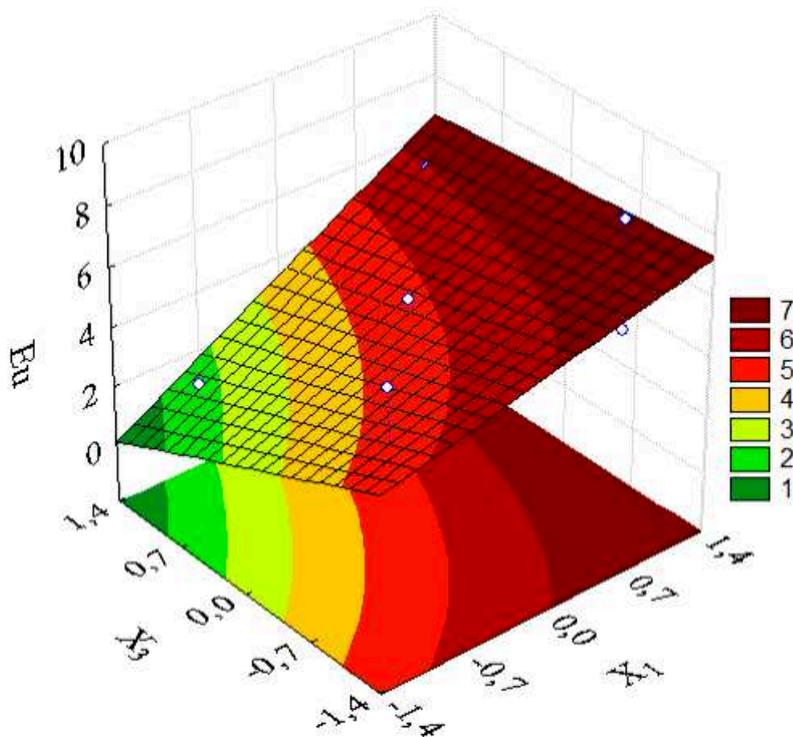


Figura 4.19: Superfície resposta para Eu em função de X_1 e X_3 .

filtrante. O comportamento da superfície é não linear, com efeitos similares entre as duas variáveis, mas com efeito de interação entre as variáveis, conforme ratificado pela diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.17. A interação entre as duas variáveis propicia

um efeito contrário ao de cada variável. Enquanto o aumento, seja da permeabilidade ou vazão, leva à diminuição de E_u , o efeito de interação aumenta o número de Euler. Como dito anteriormente, o aumento da permeabilidade diminui a pressão estática no ciclone e, conseqüentemente, a queda de pressão, enquanto o aumento da vazão eleva a velocidade de alimentação, portanto em relação a essas variáveis o custo energético será menor quanto maiores forem a permeabilidade e a vazão de operação. O comportamento da variável resposta em relação aos termos independentes, considerando somente os termos significativos é apresentado na Equação 4.7

$$E_u = 4,66 - 0,89X_2 - 0,91X_3 + 0,61X_2X_3 \quad (4.7)$$

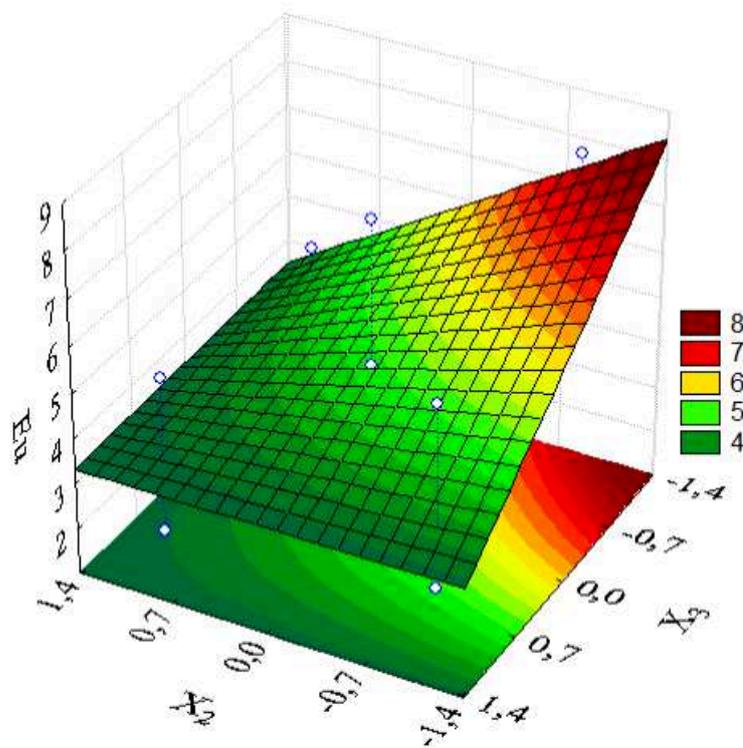


Figura 4.20: Superfície de resposta para E_u em função de X_2 e X_3 .

Efeitos das Variáveis sobre a Razão de Filtrado (R_f)

A razão de filtrado está associada às forças de inércia inerentes aos escoamento e à resistência à filtração, sendo esta definida como a razão entre a vazão volumétrica de filtrado e a vazão volumétrica alimentada no ciclone. Semelhante ao que fora feito para o número de Euler, o mesmo foi realizado, a fim de avaliar o efeito das variáveis dependentes sobre a razão de Filtrado (R_f).

A análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 4.5 mostra que o modelo

representa a variabilidade dos dados experimentais com $R^2 = 0,96473$; o que cabe inferir que tal modelo proposto descreve bem a influência das variáveis independentes em relação a razão volumétrica de filtrado.

Tabela 4.5: Análise de variância (ANOVA) e Coeficientes de regressão para R_f

Variável	Coefficiente de regressão	Valor de F	Valor de P
β_0	0,654678		
Linear			
β_1	-0,134582	48,1930	0,000119
β_2	0,061915	10,2000	0,012731
β_3	0,222362	131,5623	0,000003
Quadrático			
β_{11}	0,020646	0,7561	0,409878
β_{22}	-0,014448	0,3703	0,559735
β_{33}	-0,099170	17,4453	0,003093
Interação			
β_{12}	0,015780	0,4417	0,524990
β_{13}	0,054763	5,3198	0,049964
β_{23}	0,050687	4,5573	0,065305
R^2	0,96473		

Baseando no diagrama de Pareto representado na Figura 4.21 e na tabela de Anova da Tabela 4.5, verifica-se que existem três fatores significantes, efeito de interação e o efeito quadrático, com nível de confiança de 95%: a permeabilidade ; a altura da alimentação ; a vazão volumétrica de alimentação, a interação entre a altura da alimentação e a permeabilidade e o termo quadrático referente à permeabilidade. A variável vazão de alimentação, mesmo sendo uma variável significativa, é o fator que menos afeta R_f , sendo a permeabilidade aquela que apresenta maior efeito sobre a variável resposta.

A Figura 4.22 apresenta o gráfico de superfície resposta para R_f em função da altura da alimentação e da vazão de alimentação, mantendo a outra variável no ponto central. O comportamento da superfície é linear, com efeito maior para a dimensão da alimentação em relação a vazão de alimentação, conforme ilustra o diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.21. Portanto, em relação às duas variáveis independentes, a região associada ao maior valor de R_f está associada ao aumento da vazão com diminuição da altura da alimentação, uma vez que em ambos os casos, eleva-se a velocidade de entrada de modo que a força de inércia no interior do ciclone torna-se maior. O comportamento da variável resposta em relação aos termos independentes, considerando somente os termos significativos é apresentado na Equação 4.8

$$R_f = 0,66 - 0,13X_1 + 0,06X_2 \quad (4.8)$$

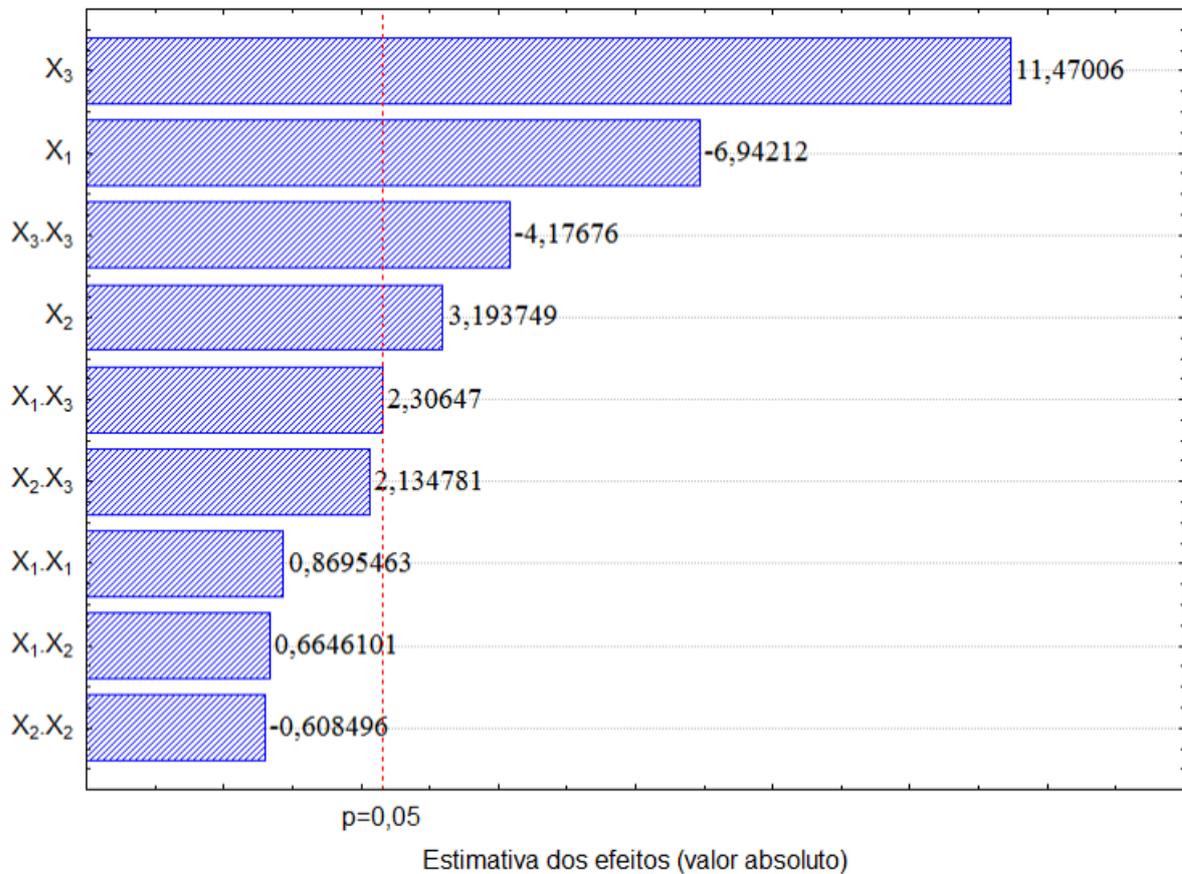


Figura 4.21: Diagrama de Pareto para a variável R_f .

A Figura 4.23 apresenta o gráfico de superfície de resposta para a razão de filtrado em função da altura da alimentação e da permeabilidade. O comportamento da superfície é não linear devido ao efeito de interação das variáveis e o efeito quadrático associado à permeabilidade. Neste caso, verifica-se que o efeito linear da permeabilidade é preponderante em relação aos efeitos quadráticos, de interação e da altura da alimentação, conforme ilustra o diagrama de Pareto apresentado na Figura 4.21. Nota-se que o valor de R_f será maior nos casos de maior permeabilidade associada ao ciclone com menor altura na alimentação, graças aos maiores efeitos cinéticos proporcionados ao escoamento. O comportamento da variável resposta em relação aos termos independentes, considerando somente os termos significativos é apresentado na Equação 4.9

$$R_f = 0,66 - 0,13X_1 + 0,22X_3 + 0,06X_1X_3 - 0,10X_3^2 \quad (4.9)$$

A Figura 4.24 apresenta o gráfico de superfície resposta para R_f em função respectivas variáveis codificadas de vazão e de permeabilidade. Observando a figura, nota-se a predominância de uma comportamento quadrático na superfície devido à permeabilidade, não contemplando efeitos de interação entre as variáveis. Entretanto, a relação com a

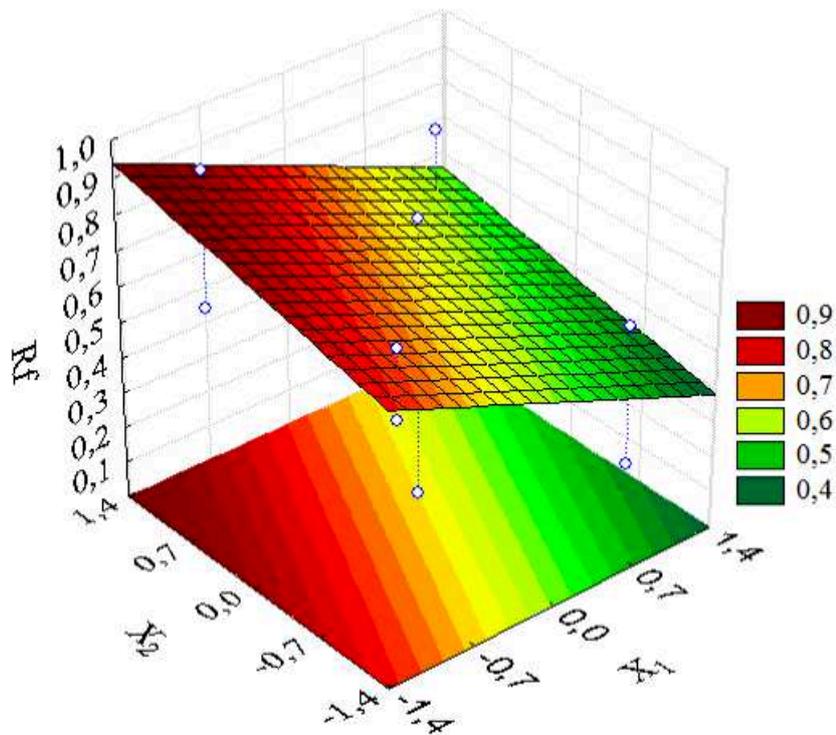


Figura 4.22: Superfície de resposta para R_f em função de X_1 e X_2 .

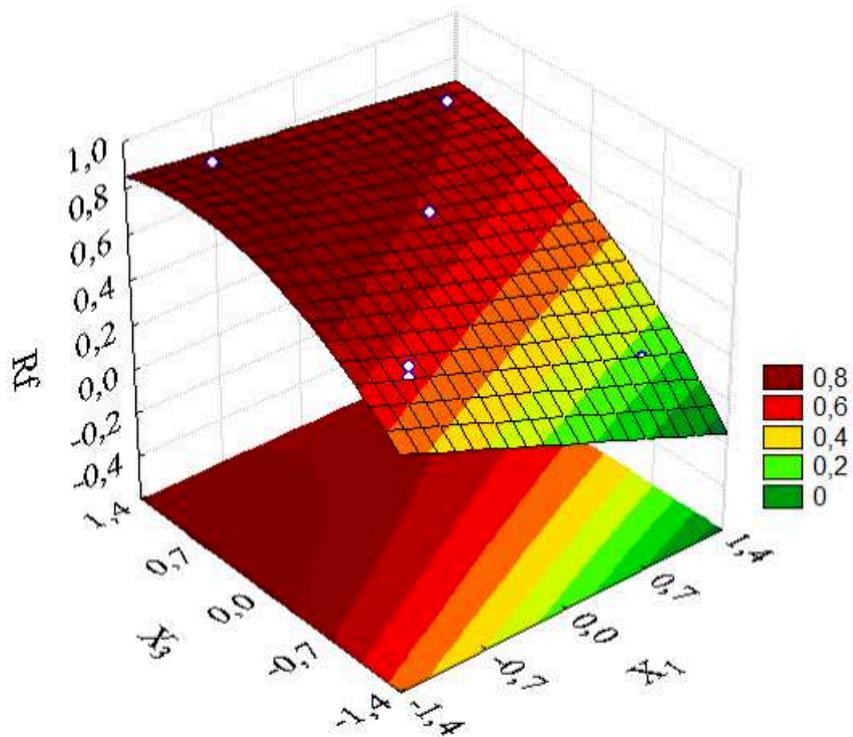


Figura 4.23: Superfície de resposta para R_f em função de X_1 e X_3 .

vazão é de proporcionalidade dados aos valores positivos dos coeficientes apresentados na Tabela 4.5. O comportamento da variável resposta em relação aos termos independentes, considerando somente os termos significativos é apresentado na Equação 4.10

$$R_f = 0,66 + 0,06X_2 + 0,22X_3 + 0,05X_2X_3 - 0,10X_3^2 \quad (4.10)$$

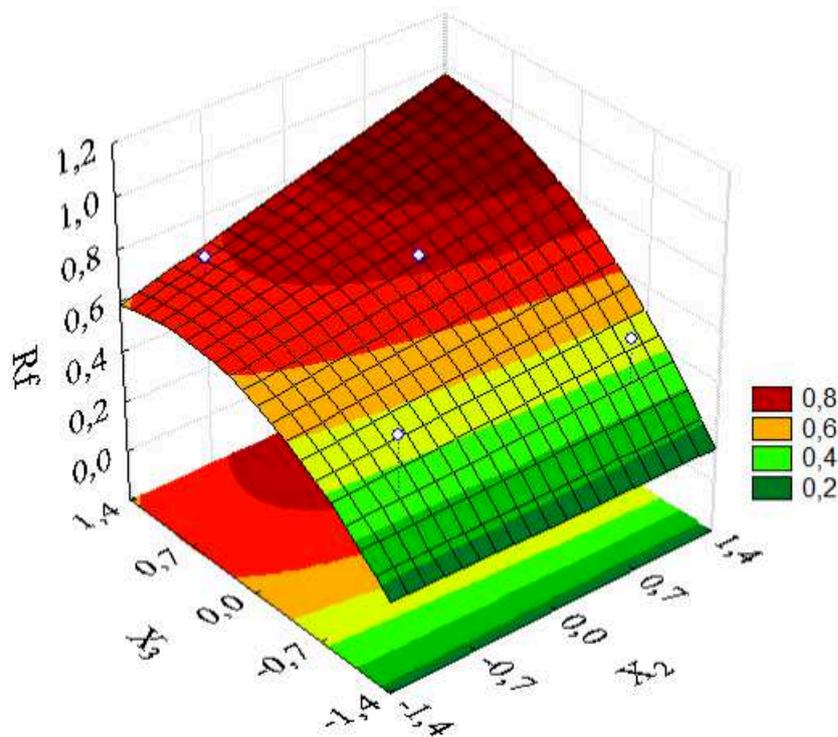


Figura 4.24: Superfície de resposta para R_f em função de X_2 e X_3 .

4.2.6 Efeito da Permeabilidade sobre o Escoamento do Ciclone Filtrante

Como dito anteriormente, a presença do meio filtrante gera algumas instabilidades nos vórtices formados no interior do ciclone. Uma das formas de analisar o comportamento fluidodinâmico em ciclones é analisando os perfis de velocidades tangencial e axial. Para isso, verificando que os valores máximos de velocidade tangencial estavam associados à entrada do *vortex finder*, foram analisados os perfis velocidades correspondente à altura em $Z= 1,195$ m.

A partir do planejamento de experimentos numéricos executado no FLUENT, analisando somente a parte fatorial, foi possível avaliar o efeito da permeabilidade sobre o

comportamento fluidodinâmico no interior dos ciclones filtrantes. Para isso foram determinados os valores de velocidades axial e tangencial na seção de separação, correspondente à entrada do *vortex finder*.

As Figuras 4.25, 4.26 , 4.27 ,4.28 apresentam os efeitos da permeabilidade sobre os perfis de velocidade tangencial em função da distância radial, ambas adimensionalizadas.

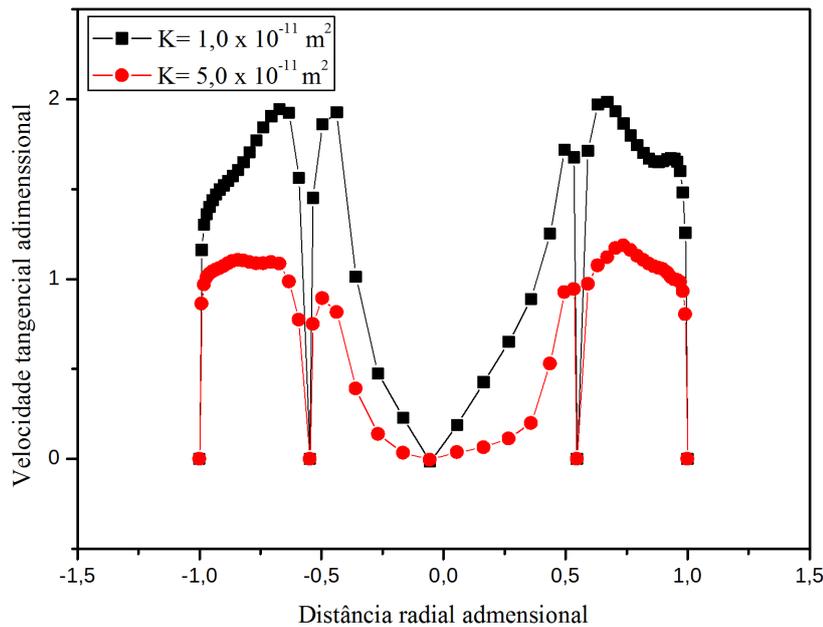


Figura 4.25: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 0,057$ m.

Observando-se a Figura 4.25, nota-se que as velocidades tangenciais aumentam com a diminuição da permeabilidade do meio filtrante, o que leva a crer, para as condições retratadas na figura, que a diminuição da permeabilidade possa aumentar a eficiência de coleta no ciclone filtrante devido o aumento da força de inércia (*força centrífuga*) associada à velocidade tangencial. Em contrapartida, o aumento do valor da velocidade tangencial, na saída do vortex finder elevará a queda de pressão do ciclone devido a velocidade (HOFFMANN; STEIN, 2007), aumentando assim o consumo energético.

Ao fazer uma análise semelhante referente à Figura 4.26, verifica-se que o efeito da diminuição da permeabilidade foi menos significativo em relação ao vórtice externo (vórtice livre), quando se opera o ciclone filtrante numa maior vazão volumétrica de alimentação. Isto é provocado pelo aumento da vazão, que minimiza os efeitos da diminuição da permeabilidade, mantendo as características cinéticas invariáveis próximo à parede do ciclone, mesmo com a diminuição da permeabilidade.

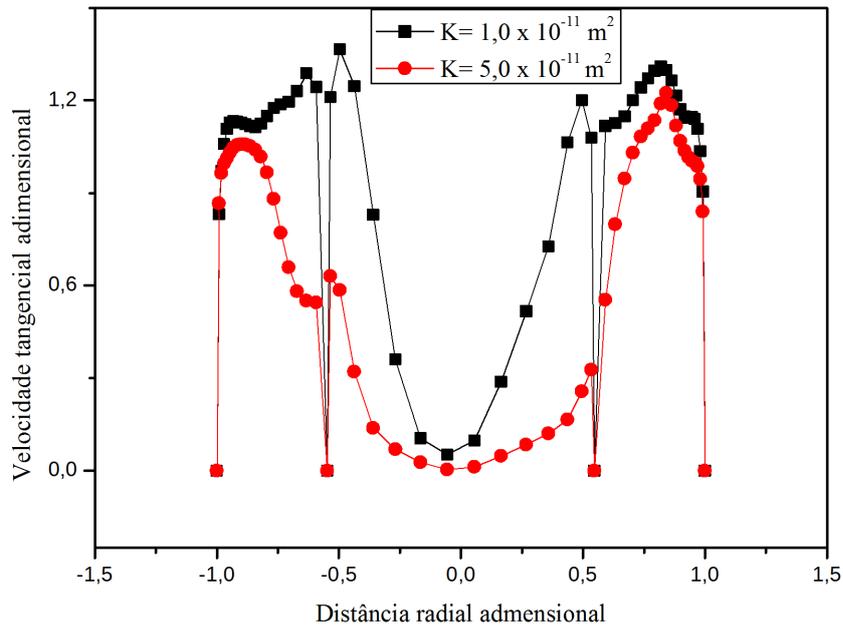


Figura 4.26: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095 \text{ m}$ com $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 0,057 \text{ m}$.

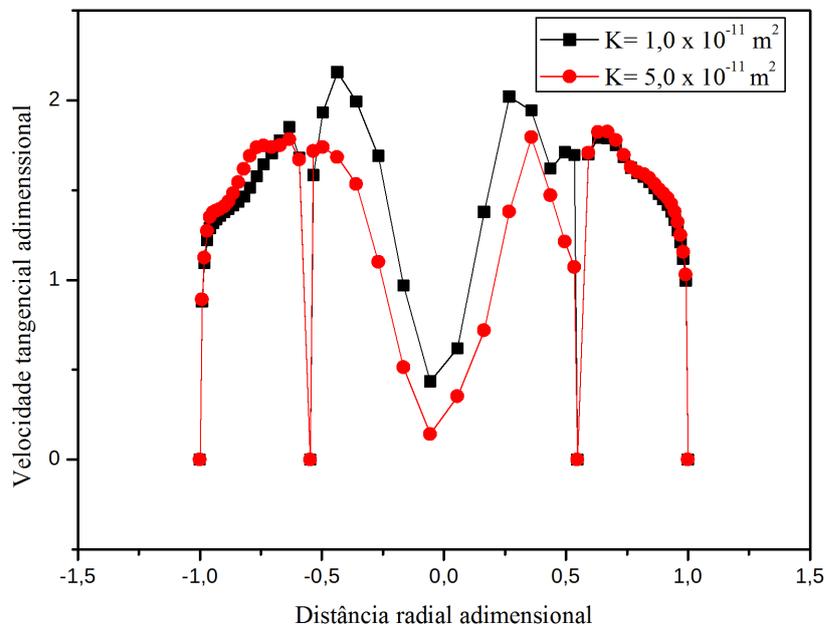


Figura 4.27: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095 \text{ m}$ com $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 0,133 \text{ m}$.

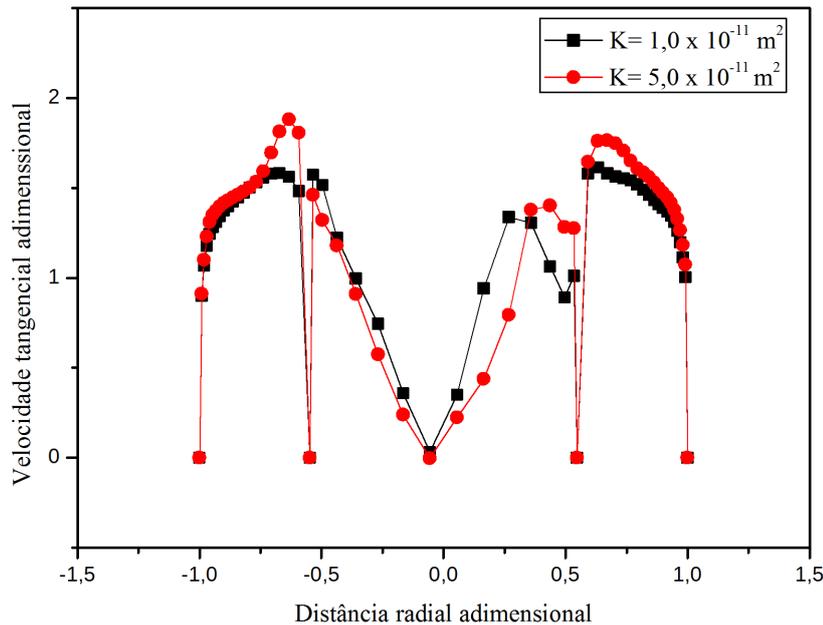


Figura 4.28: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 0,133$ m.

Ao analisar as Figuras 4.27 e 4.28, verifica-se que o efeito da permeabilidade no escoamento é mínimo, isso se deve ao aumento da altura da alimentação. Possivelmente o maior efeito associado à elevação da altura da alimentação foi preponderante frente as perturbações no escoamento oriundas da diminuição da permeabilidade. Ao comparar as Figuras 4.25 e 4.27 a observação é válida, .

Portanto a partir da análise das Figuras 4.25,4.26, 4.27, e 4.28, Fica explícito que quanto menores forem a vazão de operação e a altura da alimentação, maior será a sensibilidade do processo de separação à permeabilidade do meio filtrante.

As Figuras F.1, F.2 , F.3 ,F.4, localizadas no Apêndice F, retratam os efeitos da permeabilidade sobre a velocidade axial em função da distância radial, ambas adimensionalizadas. Em relação aos perfis de velocidade axial, verifica-se que o efeito da permeabilidade foi mínimo. Somente em baixas vazões e menor altura da alimentação, representados pela Figura F.1, a variação da permeabilidade proporcionou modificações mais significativas no escoamento. O baixo efeito da permeabilidade sobre os perfis de velocidades axiais pode interferir na eficiência de coleta, uma vez que a velocidade axial descendente próximo à parede do ciclone contribui significativamente para coleta do particulado.

4.2.7 Efeito da Vazão de Alimentação sobre o Escoamento do Ciclone Filtrante

O efeito da vazão sobre o comportamento fluidodinâmico em ciclones filtrantes pode ser analisado em função dos perfis de velocidades no interior do ciclone. Os perfis de velocidades tangencial são apresentados nas Figuras 4.29, 4.30, 4.31, 4.32 e os de velocidade axial nas Figuras F.5, F.6, F.7, F.8 no Apêndice F.

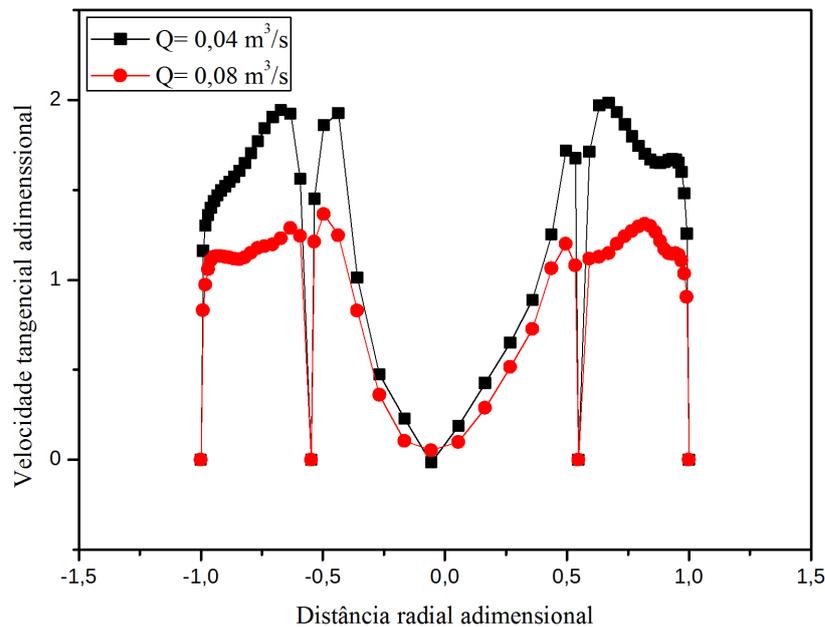


Figura 4.29: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $a = 0,057$ m.

Com base na Figura 4.29, verifica-se que o aumento da vazão de alimentação reduz o perfil de velocidade tangencial, diminuindo os valores máximos. Entretanto, a diminuição significativa da velocidade tangencial somente foi verificada para baixos valores de permeabilidades, conforme apresentado nas Figuras 4.29 e 4.31. Para uma maior permeabilidade, casos apresentados nas Figuras F.6 e F.8, verificam-se efeitos insignificantes na formação dos vórtices.

Ao comparar as Figuras 4.29 e 4.31, nota-se que o aumento da vazão provoca perturbações diferentes em relação aos vórtices interno e externo. Enquanto que para uma menor altura da seção de alimentação o efeito da vazão é predominante no vórtice externo, para uma maior altura, o efeito da diminuição da velocidade tangencial está associado ao vórtice interno. Possivelmente, tal efeito é devido a maior troca de quantidade de movimento junto à parede do ciclone, fato que propicia uma menor energia cinética para o fluido na

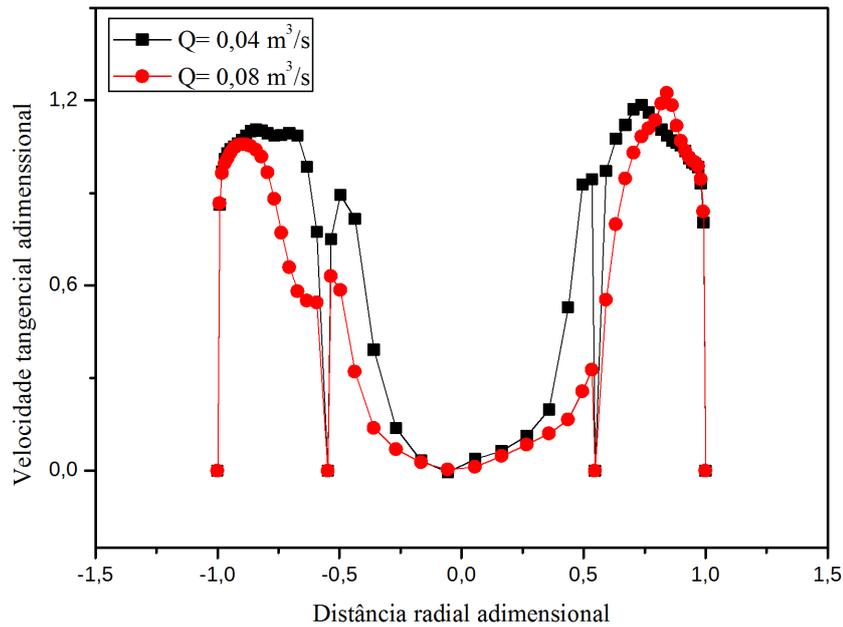


Figura 4.30: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $a = 0,057$ m.

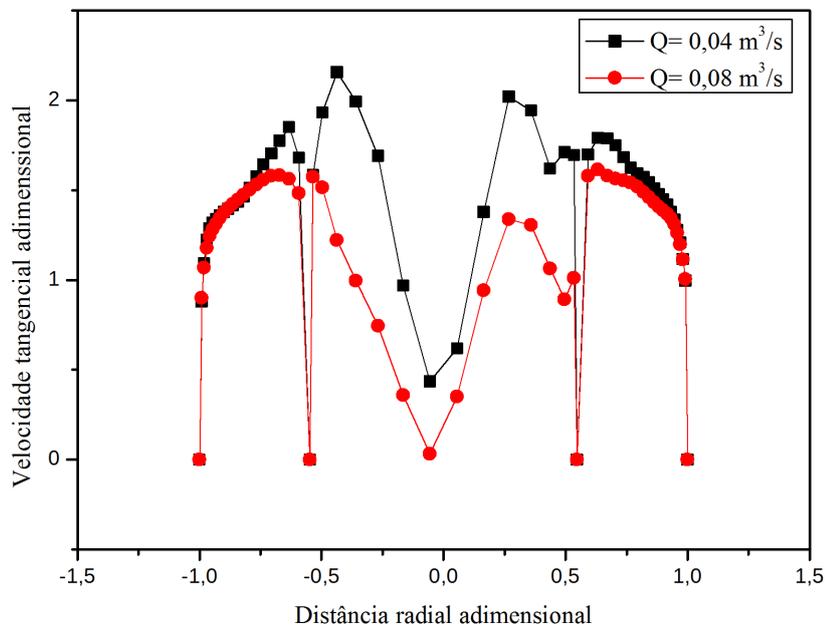


Figura 4.31: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $a = 0,133$ m.

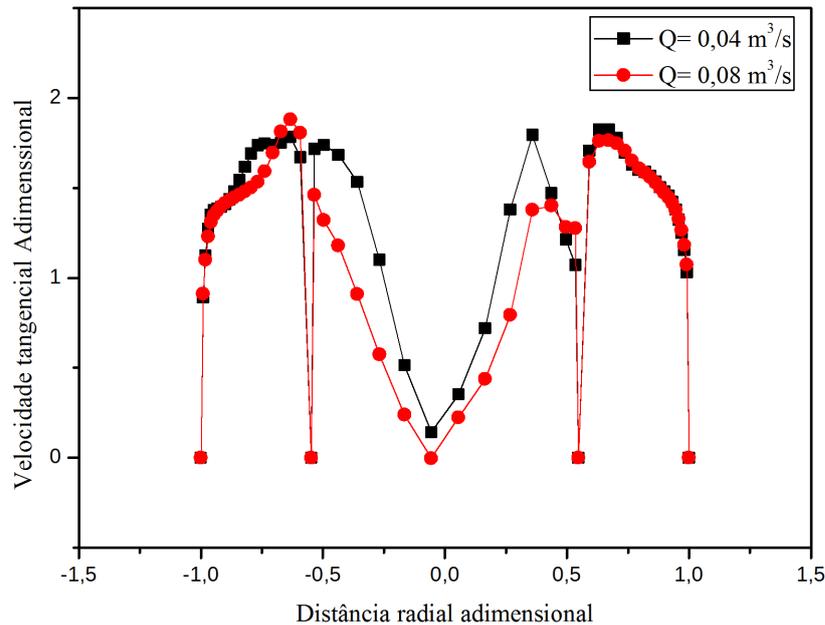


Figura 4.32: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $a = 0,133$ m.

região central do ciclone filtrante com o aumento da vazão.

Quanto ao efeito da vazão sobre a velocidade axial, verifica-se que o efeito da vazão somente apresentou variação significativa para um menor valor de permeabilidade, conforme apresentado na Figura F.5. Para todos os outros casos apresentados nas Figuras F.6, F.7, F.8, verifica-se que o efeito da vazão não é muito significativo. Em baixa permeabilidade e menor altura da alimentação, houve uma inversão no perfil de velocidade axial com o aumento da vazão.

4.2.8 Efeito da Altura da Alimentação sobre o escoamento do Ciclone Filtrante

O efeito da altura da alimentação, conforme apresentado na Figura 4.17 é uma variável que interfere no desempenho do ciclone filtrante. Afim de avaliar o efeito desta variável sobre os perfis de velocidades no interior do ciclone, foram elaborados os perfis de velocidades tangencial, apresentados nas Figuras 4.33, 4.34, 4.35, 4.36; e os perfis de velocidade axial, apresentados nas Figuras F.9, F.10, F.11, F.12 localizadas no Apêndice F.

Analisando os perfis de velocidade tangencial associados às figuras citadas, verifica-se

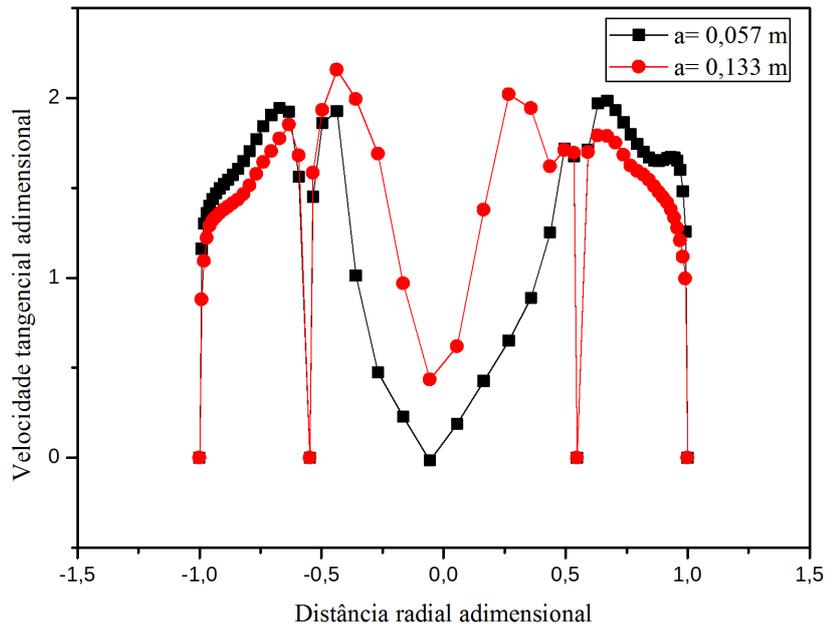


Figura 4.33: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,04 m^3/s$.

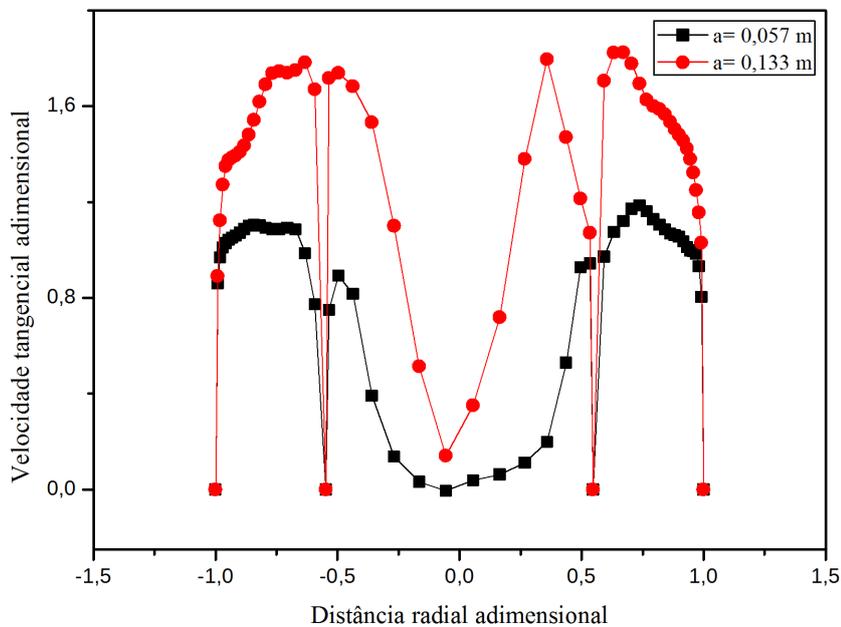


Figura 4.34: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,04 m^3/s$.

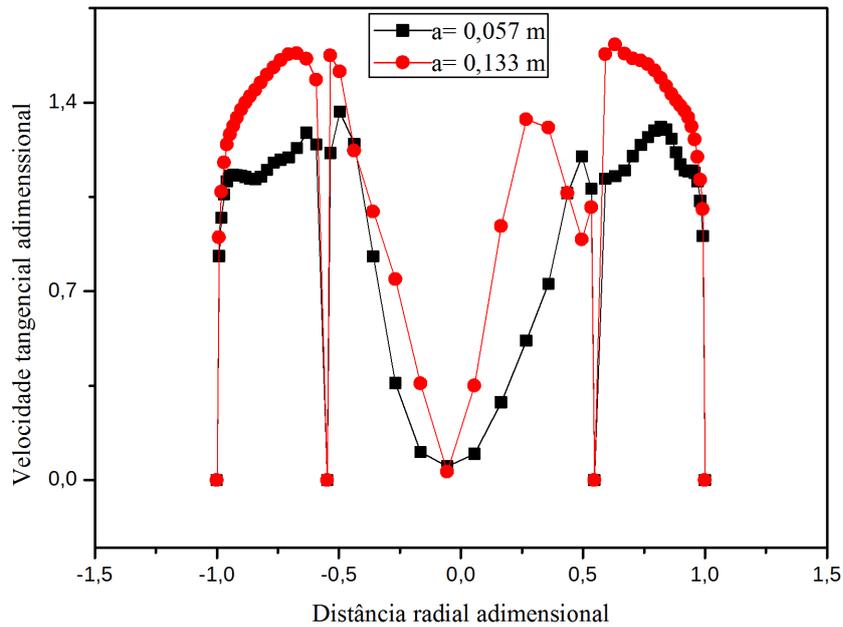


Figura 4.35: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,08 m^3/s$.

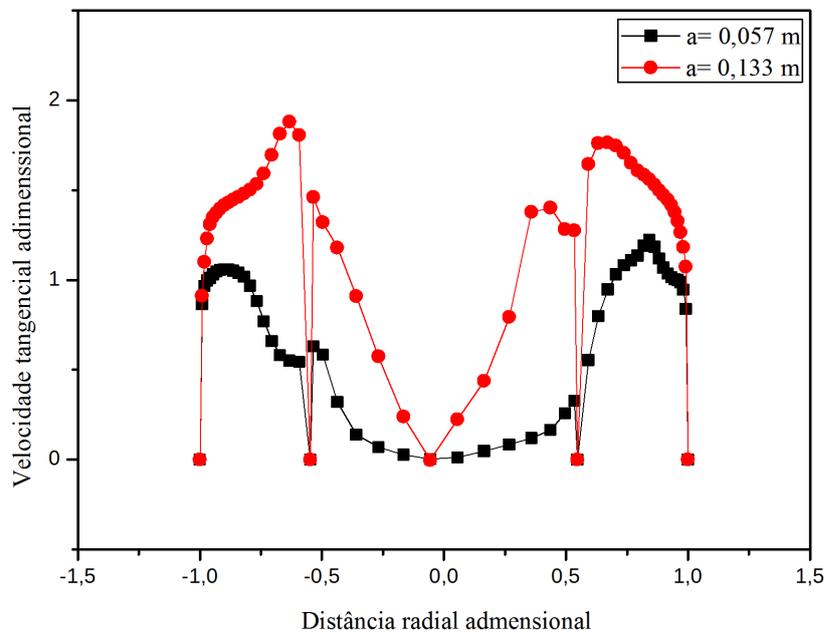


Figura 4.36: Perfis radiais de velocidade tangencial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11} m^2/s$ e $Q = 0,08 m^3/s$.

que o aumento da dimensão da altura da alimentação leva a uma aumento nos valores máximos de velocidade tangencial em todos os casos analisados, conforme é apresentado nas Figuras 4.34, 4.35,4.36, exceto para o caso onde tem-se baixos valores de permeabilidade e vazão de operação.

Em relação aos perfis de velocidade axial, apresentados, verifica-se que o aumento da altura proporciona um aumento da velocidade axial no sentido descendente, o que de certa forma favorece a coleta de partículas no ciclone melhorando a eficiência.

Na situação onde apresenta uma permeabilidade mais elevada, verifica-se que o efeito da altura da alimentação sobre a velocidade axial é menos significativo, conforme a Figura F.12.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões



ESTE CAPÍTULO, com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, apresenta as principais conclusões obtidas referentes ao estudo teórico-experimental sobre ciclones filtrantes e propõe sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

5.1 Conclusões

- O tratamento estatístico dos dados experimentais mostrou que a variável comprimento da altura da alimentação foi a variável com maior efeito sobre o desempenho (E_u);
- O tratamento estatístico dos resultados experimentais mostrou que a permeabilidade do meio filtrante foi a variável com maior efeito sobre a razão de filtrado (R_f);
- Após análise dos resultados experimentais e computacionais, foi possível verificar que a permeabilidade afeta significativamente os perfis de velocidades no interior do ciclone filtrante;
- Após análise dos resultados computacionais, notou-se que o comprimento da altura da alimentação interfere no desempenho (E_u) e no comportamento fluidodinâmico em ciclone filtrante, no que diz respeito aos perfis de velocidades;
- Após análise dos resultados computacionais, foi possível verificar que a vazão volumétrica da alimentação interfere no desempenho e no comportamento fluidodinâmico em ciclone

filtrante;

- Os resultados experimentais para determinação da permeabilidade mostraram que a geometria interfere na determinação da permeabilidade em ciclone filtrante;
- Dentre as metodologias propostas para a determinação da permeabilidade, a metodologia 03 foi a que apresentou resultados mais coerentes, por levar em consideração os efeitos geométricos associados à área do filtro e ao mesmo tempo preservar as características reais do escoamento; sendo indicada para determinação da permeabilidade em ciclones filtrantes;
- Em elevadas velocidades de alimentação, a queda de pressão em ciclones filtrantes são inferiores àquelas encontradas em ciclone convencional nas mesmas condições.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Estudar, via CFD, o efeito da injeção externa de ar limpo pelo cone sobre o comportamento fluidodinâmico e desempenho em ciclones filtrantes, proposta primeiramente por Fukui et al. (2011);
- Estudar o efeito de diferentes meios filtrantes cerâmicos, avaliando o efeito da permeabilidade em relação o desempenho de ciclones;
- Aperfeiçoar a técnica numérica, afim de entender o melhor processo de filtração em baixíssimas permeabilidades;
- Avaliar numericamente o efeito do comprimento do vórtice sobre o desempenho de ciclones filtrantes;
- Estudar o comportamento para diferentes vazões mássicas de alimentação;
- Ampliar este estudo para outros sólidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, A. C.; BARROZO, M. S.; DAMASCENO, J. J. R. Estudo do efeito do tamanho da seção cônica sobre o desempenho de ciclones com mangas. 2002.
- ANSYS, A. F. 14.0 theory guide. *ANSYS inc*, 2011.
- AVCI, A.; KARAGOZ, I. Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators. *Journal of Aerosol Science*, Elsevier, v. 34, n. 7, p. 937–955, 2003.
- AVCI, A.; KARAGOZ, I.; SURMEN, A. Development of a new method for evaluating vortex length in reversed flow cyclone separators. *Powder Technology*, Elsevier, v. 235, p. 460–466, 2013.
- AZADI, M.; AZADI, M. An analytical study of the effect of inlet velocity on the cyclone performance using mathematical models. *Powder Technology*, Elsevier, v. 217, p. 121–127, 2012.
- BARROZO, M.; DAMASCENO, J.; LANNA, A. Estudo do desempenho de um hidrociclone filtrante. *Revista Ciência & Engenharia*, v. 1, p. 175–186, 1992.
- BATCHELOR, G. K. *An introduction to fluid dynamics*. New York: Cambridge university press, 2000.
- BERNARDO, S. *Estudo dos Escoamentos Gasoso e Gás-Sólido em Ciclones pela Aplicação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD)*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Química)) — FEQ/UNICAMP, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas., 2005.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- BOX, M. J.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. *Statistics for Experiments: An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*. New York: John Wiley and Sons, 1978.

- BOYSAN, F.; AYRES, W. H.; SWITENBANK J, A. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design. *J. Trans. IchemE*, v. 60, n. p.222-230, 1982.
- CARMAN, P. Fluid flow through granular beds. *Transactions-Institution of Chemical Engineeres*, v. 15, p. 150–166, 1937.
- CHEN, J.; SHI, M. A universal model to calculate cyclone pressure drop. *Powder technology*, Elsevier, v. 171, n. 3, p. 184–191, 2007.
- CONCHA, F. A. *Solid-Liquid Separation in the Mining Industry*. New York: Springer, 2014.
- CORBINI, L. X. *Avaliação da perda de carga em um filtro granular em escala bancada para remoção de particulados oriundos da gaseificação/combustão de carvões*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química., 2012.
- CORTES, C.; GIL, A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in energy and combustion Science*, Elsevier, v. 33, n. 5, p. 409–452, 2007.
- CRISTEA, E. D.; COGUE, A. 3D numerical computation and validation of high solid loading flow inside a gas cyclone separator. p. ,p. 7pp., 1998.
- CRISTEA, E. D.; MALFA, E. 3D simulation and experiments of cement rotary kiln pre-heater top cyclone. , *Harrogate*, p. p. 18, 1994.
- J. J. R. Damasceno e M. A. S. Barrozo. *Ciclone Filtrante*. 18 nov 2008. PI0701119-09A2.
- DERKSEN, J. Separation performance predictions of a stairmand high-efficiency cyclone. *AIChE Journal*, Wiley Online Library, v. 49, n. 6, p. 1359–1371, 2003.
- DERKSEN, J.; AKKER, H. Van den; SUNDARESAN, S. Two-way coupled large-eddy simulations of the gas-solid flow in cyclone separators. *AIChE journal*, Wiley Online Library, v. 54, n. 4, p. 872–885, 2008.
- DERKSEN, J.; SUNDARESAN, S.; AKKER, H. Van den. Simulation of mass-loading effects in gas–solid cyclone separators. *Powder Technology*, Elsevier, v. 163, n. 1, p. 59–68, 2006.
- DIAS, D. *Avaliação de técnicas de fluidodinâmica computacional em ciclones*. 2009. 126 f. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2009.
- DITTLER, A.; KASPER, G. Simulation of operational behaviour of patchily regenerated, rigid gas cleaning filter media. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Elsevier, v. 38, n. 4, p. 321–327, 1999.
- ELSAIED, K. *Analysis and Optimization of Cyclone Separators Geometry Using RANS and LES Methodologies*. Tese (Doutorado) — Vrije Universiteit Brussel, Brussels, 2011.

- ELSAYED, K.; LACOR, C. The effect of cyclone height on the flow pattern and performance using les. In: ICFD, P. of (Ed.). *Tenth international congress of fluid dynamics (ICFD10), ASME, Egypt, ICFD10-EG-3003, Ain Soukhna, Red Sea, Egypt.* Ain Soukhna, 2010. v. 10.
- ELSAYED, K.; LACOR, C. The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 1952–1968, 2011.
- ELSAYED, K.; LACOR, C. Modeling, analysis and optimization of aircyclones using artificial neural network, response surface methodology and cfd simulation approaches. *Powder technology*, Elsevier, v. 212, n. 1, p. 115–133, 2011.
- ELSAYED, K.; LACOR, C. The effect of the dust outlet geometry on the performance and hydrodynamics of gas cyclones. *Computers & Fluids*, Elsevier, v. 68, p. 134–147, 2012.
- ELSAYED, K.; LACOR, C. CFD modeling and multi-objective optimization of cyclone geometry using desirability function, artificial neural networks and genetic algorithms. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 37, n. 8, p. 5680–5704, 2013.
- FABIAO, P. N. d.; WIGGERS, V. R.; REINEHR, E. L. Análise experimental e numérica do escoamento multifásico gás-sólido em ciclones. 2010.
- FLUENT, A. 14.0 tutorial guide—ansys. *Inc. Southpointe*, 2011.
- FUKUI, K.; YOSHIDA, H.; JIKIHARA, K.; YAMAMOTO, T. Effects of clean-air injection on particle-separation performance of novel cyclone with sintered metal cone. *Separation and Purification Technology*, Elsevier, v. 80, n. 2, p. 356–363, 2011.
- GAMBIT, G. 2.2 tutorial guide. *Lebanon, NH.*, Fluent Inc., Setember 2004.
- GEBART, B. Permeability of unidirectional reinforcements for rtm. *Journal of composite materials*, Sage Publications, v. 26, n. 8, p. 1100–1133, 1992.
- GRIFFITHS, W.; BOYSAN, F. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science*, Elsevier, v. 27, n. 2, p. 281–304, 1996.
- GRONALD, G.; DERKSEN, J. Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: a comparison of various modeling approaches. *Powder technology*, Elsevier, v. 205, n. 1, p. 160–171, 2011.
- HINZE, J. *Turbulence, 790 pp.* New York: McGraw-Hill, 1975.
- HOEKSTRA, A.; DERKSEN, J.; AKKER, H. V. D. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 54, n. 13, p. 2055–2065, 1999.
- HOFFMANN, A.; SANTEN, A. V.; ALLEN, R.; CLIFT, R. Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones. *Powder Technology*, Elsevier, v. 70, n. 1, p. 83–91, 1992.

- HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. Gas cyclones and swirl tubes. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, Springer, v. 2008, 2002.
- HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design and operation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- HOSSEINI, S.; TAFRESHI, H. V. Modeling particle-loaded single fiber efficiency and fiber drag using ansys-fluent cfd code. *Computers & Fluids*, Elsevier, v. 66, p. 157–166, 2012.
- HUTCHINSON, B.; RAITHBY, G. A multigrid method based on the additive correction strategy. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Taylor & Francis, v. 9, n. 5, p. 511–537, 1986.
- JAYARAJU, S. T. *Study of the air flow and aerosol transport in the human upper airway using LES and DES methodologies*. Tese (Doutorado) — Vrije Universiteit Brussel, 2009.
- KAYA, F.; KARAGOZ, I. Performance analysis of numerical schemes in highly swirling turbulent flows in cyclones. *Current science*, v. 94, n. 10, p. 1273–1278, 2008.
- KEPA, A. Division of outlet flow in a cyclone vortex finder the CFD calculations. *Separation and Purification Technology*, Elsevier, v. 75, n. 2, p. 127–131, 2010.
- KOZENY, J. *Über kapillare Leitung des Wassers im Boden: (Aufstieg, Versickerung und Anwendung auf die Bewässerung)*. Sitzungsber Akad: Hölder-Pichler-Tempsky, 1927.
- LACERDA, A. F. *Estudo dos efeitos das variáveis geométricas no desempenho de ciclones convencionais e filtrantes*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia: FEQ/UFU, 2007.
- LAGE, J. The fundamental theory of flow through permeable media from darcy to turbulence. *Transport phenomena in porous media*, Elsevier, p. 1, 1998.
- LAUNDER, B.; REECE, G. J.; RODI, W. Progress in the development of a reynolds-stress turbulence closure. *Journal of fluid mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 68, n. 03, p. 537–566, 1975.
- LEE, J. W.; YANG, H. J.; LEE, D. Y. Effect of the cylinder shape of a long-coned cyclone on the stable flow-field establishment. *Powder technology*, Elsevier, v. 165, n. 1, p. 30–38, 2006.
- LEITH, D.; FAYED, M.; OTTEN, L. Handbook of powder science and technology. *Van Nostrana Rheinhold*, p. 730, 1984.
- LO, L. M.; HU, S. C.; CHEN, D. R.; PUI, D. Y. Numerical study of pleated fabric cartridges during pulse-jet cleaning. *Powder Technology*, Elsevier, v. 198, n. 1, p. 75–81, 2010.
- MALISKA, C. R. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2000.
- MASSARANI, G. *Filtração*. Rio de Janeiro: RBE, 1985.

- MASSARANI, G. Aspectos da fluidodinâmica em meios porosos. *Revista Brasileira de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil*, 1989.
- MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em sistemas particulados*. Rio de Janeiro: Editora E-papers, 1997.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. United States: John Wiley & Sons, 2010.
- NARASIMHAN, A. The role of porous medium modeling in biothermofluids. *Journal of the Indian Institute of Science*, v. 91, n. 3, p. 243–266, 2012.
- OGAWA, A. Separation of particles from air and gases. CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 1984.
- OGAWA, A. Mechanical separation process and flow patterns of cyclone dust collectors. v. 50, 1997.
- PARK, K.; HONG, C. H.; HAN, J. W.; KIM, B. S.; PARK, C. S.; KWON, O. K. The effect of cyclone shape and dust collector on gas-solid flow and performance. *World Academy of Science, Eng. and Tech*, v. 61, p. 252–257, 2012.
- PATANKAR, S. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Boca Raton: CRC Press, 1980.
- PINTO, J. C.; LAGE, P. L. C. *Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química*. Rio de Janeiro: E-papers Servicos Editoriais Ltda, 1997.
- POPE, S. *Turbulent flows*. New York: Cambridge university press, 2000.
- PORCIUNCULA, C. B.; MARCILIO, N. R.; SECCHI, A. R. Simulação fluidodinâmica de filtro seco para remoção de particulados à baixa temperatura. 2010.
- RAOUFI, A.; SHAMS, M.; FARZANEH, M.; EBRAHIMI, R. Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Elsevier, v. 47, n. 1, p. 128–137, 2008.
- ROCHA, S. M. S. *Estudo da influência da velocidade e dos ciclos de filtração na formação da torta na limpeza de gases em filtros de mangas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia: FEQ/UFU, 2010.
- RODRIGUES, M.; AROUCA, F.; BARROZO, M.; DAMASCENO, J. Analysis of the efficiency of a cloth cyclone: the effect of the permeability of the filtering medium. *Brazilian journal of chemical engineering*, SciELO Brasil, v. 20, n. 4, p. 435–443, 2003.
- RODRIGUES, M. V. *Análise do Desempenho de um Ciclone com Mangas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia: FEQ/UFU, 2001.
- SAFIKHANI, H.; AKHAVAN-BEHABADI, M.; SHAMS, M.; RAHIMYAN, M. Numerical simulation of flow field in three types of standard cyclone separators. *Advanced Powder Technology*, Elsevier, v. 21, n. 4, p. 435–442, 2010.

- SALEH, A.; TAFRESHI, H. V. A simple semi-numerical model for designing pleated air filters under dust loading. *Separation and Purification Technology*, Elsevier, v. 137, p. 94–108, 2014.
- SEVILLE, J. P. *Gas cleaning in demanding applications*. New York: Blackie Academic & Professional London, 1997.
- SHALABY, H. H. *On the Potential of Large Eddy Simulation to Simulate Cyclone Separators*. Tese (Doutorado) — Von der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Germany, 2007. 2007. 121 p p.
- SHUKLA, S. K.; SHUKLA, P.; GHOSH, P. Evaluation of numerical schemes using different simulation methods for the continuous phase modeling of cyclone separators. *Advanced Powder Technology*, Elsevier, v. 22, n. 2, p. 209–219, 2011.
- SHUKLA, S. K.; SHUKLA, P.; GHOSH, P. The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction of collection efficiency of cyclone separators. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 37, n. 8, p. 5774–5789, 2013.
- SILVEIRA NETO, A. *Turbulência nos Fluidos Aplicada*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- SLACK, M.; PRASAD, R.; BAKKER, A.; BOYSAN, F. Advances in cyclone modelling using unstructured grids. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, v. 78, n. 8, p. 1098–1104, 2000.
- SODJA, J. Turbulence models in CFD. *University of Ljubljana*, 2007.
- SOUZA, F. *Análise da influência do meio filtrante no comportamento de hidrociclone filtrante*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia: FEQ/UFU, 1999.
- 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*, Elsevier, v. 180, n. 1, p. 245–252, 2008.
- TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. *Computational fluid dynamics: a practical approach*. Minnesota: Butterworth-Heinemann, 2007.
- TUNG, K.-L.; LI, Y.-L.; LU, K.-T.; LU, W.-M. Effect of calendering of filter cloth on transient characteristics of cake filtration. *Separation and purification technology*, Elsevier, v. 48, n. 1, p. 1–15, 2006.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. New York: Pearson Education, 2007.
- VIEIRA, L. G. M. *Análise da separação sólido-líquido em um hidrociclone filtrante*. *Relatório de iniciação Científica. PIBIC/CNPq-UFU*. Uberlândia, 1997.
- VIEIRA, L. G. M. *Estudo da Performance de Hidrociclones Filtrantes de Rietema*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia: FEQ/UFU, 2001.

- WANG, B. *Modelling the multiphase flow in cyclones*. Tese (Doutorado) — The University of New South Wales, 2009.
- WANG, B.; XU, D.; CHU, K.; YU, A. Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*, Elsevier, v. 30, n. 11, p. 1326–1342, 2006.
- WANG, Q.; MAZE, B.; TAFRESHI, H. V.; POURDEYHIMI, B. A note on permeability simulation of multifilament woven fabrics. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 61, n. 24, p. 8085–8088, 2006.
- WANG, X.; ZHOU, Y.; WONG, W. Turbulent flow structure and swirl number effect in a cyclone. *Journal of Fluids Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, v. 133, n. 11, p. 111103, 2011.
- WECEL, G. *Fluent tutorials*. Lebanon, March 2009.
- WILCOX, D. C. et al. *Turbulence modeling for CFD*. California: DCW industries La Canada, CA, 1998.
- WU, X.; XIONG, Z.; JI, Z.; SHI, M. Numerical simulation of precessing vortex core in cyclone separator. *Journal of Chemical Industry and Engineering-China-*, CHEM INDUSTRY & ENG SOC OF CHINA, v. 58, n. 2, p. 383, 2007.
- YANG, J.; SUN, G.; GAO, C. Effect of the inlet dimensions on the maximum-efficiency cyclone height. *Separation and Purification Technology*, Elsevier, v. 105, p. 15–23, 2013.
- YAZDABADI, P.; GRIFFITHS, A.; SYRED, N. Characterization of the pvc phenomena in the exhaust of a cyclone dust separator. *Experiments in fluids*, Springer, v. 17, n. 1-2, p. 84–95, 1994.
- YOSHIDA, H. Effect of apex cone shape and local fluid flow control method on fine particle classification of gas-cyclone. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 85, p. 55–61, 2013.
- YOSHIDA, H.; NISHIMURA, Y.; FUKUI, K.; YAMAMOTO, T. Effect of apex cone shape on fine particle classification of gas-cyclone. *Powder Technology*, Elsevier, v. 204, n. 1, p. 54–62, 2010.
- YUU, S.; JOTAKI, T.; TOMITA, Y.; YOSHIDA, K. The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone. *Chemical Engineering Science*, Elsevier, v. 33, n. 12, p. 1573–1580, 1978.
- ZHAO, B.; SU, Y.; ZHANG, J. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design*, Elsevier, v. 84, n. 12, p. 1158–1165, 2006.

Anexo A

A Primeira Proposta de Patente para um Ciclone



ESTE ANEXO é apresentado a Figura 1 referente à primeira proposta de patente para um ciclone

(No Model.)

J. M. FINCH.
DUST COLLECTOR.

3 Sheets—Sheet 1.

No. 325,521.

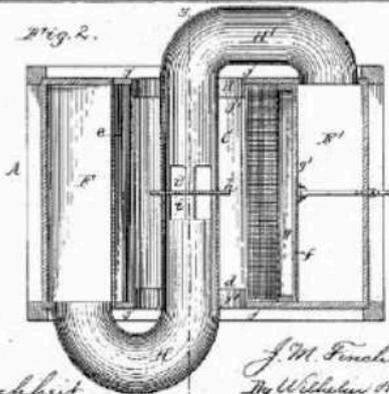
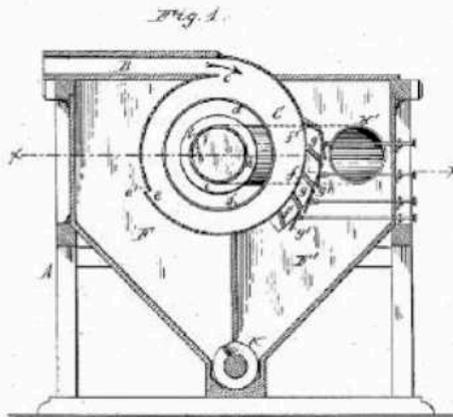
Patented Sept. 1, 1885.

UNITED STATES PATENT OFFICE.

JOHN M. FINCH, OF JACKSON, MICHIGAN, ASSIGNOR TO THE KNICKER-
BOCKER COMPANY, OF SAME PLACE.

DUST-COLLECTOR.

SPECIFICATION forming part of Letters Patent No. 325,521, dated September 1, 1885.
Application filed May 2, 1884. (No model.)



In all whom it may concern:

Be it known that I, JOHN M. FINCH, of Jackson, in the county of Jackson and State of Michigan, have invented new and useful improvements in Dust Collectors, of which the following is a specification.

This invention relates to an improvement in the class of machines which are employed in mills, factories, &c., for separating dust from air, and the object of the invention is to accomplish the separation in a simple, practical, and inexpensive manner.

Henceforth it has been attempted to separate the dust from the air by compelling the dust-laden air to assume a rotary motion, either by revolving fan-blades or by its own momentum, thereby imparting to the particles of dust a centrifugal movement which drives them against a perforated case, which separates the current of moving air from a dead air chamber. The separation of dust from air, therefore, takes place only from the fact that the particles of dust, having greater specific gravity than air, tend to follow their lines of direction and so pass through the perforations. In practice I find that much of the dust is of so slight gravity that the moving current of air overcomes the centrifugal force, and that therefore this light dust is carried forward to the outlet by the moving current and escapes from the machine with the air, whereby the object of the machine is to a large extent defeated.

The object of my invention is to overcome this difficulty, and it consists of a machine by which the dust is separated from the air by imparting to the dust-laden air currents a rapid rotary motion in a suitable separating case, thereby causing the dust particles to seek the outer edge or layer of the revolving current and accumulate in the same, then removing or straining off the outer layer or stratum of air containing the dust through one or more apertures or slots in the case into a dust chamber, in which the air current entering with the dust is permitted to expand and come to a state of comparative rest, whereby the dust is deposited in said chamber while the air is permitted to escape therefrom, as will be hereinafter fully set forth, and pointed out in the claims.

In the accompanying drawings, consisting

of three sheets, Figure 1 is a sectional elevation of my improved dust-collector. Fig. 2 is a horizontal section in line x x, Fig. 1. Fig. 3 is a side elevation of the machine. Fig. 4 is a vertical section in line y y, Fig. 2. Fig. 5 is a sectional elevation showing a modified construction of the machine.

Like letters of reference refer to like parts in the several figures.

A represents the stationary frame of the machine, and B represents the air spout or trunk through which the dust-laden air enters the machine, and which is connected with the millings purifier, grain separator, or other machine from which the dust-laden air is discharged.

C is an approximately cylindrical separating case, arranged, preferably, horizontally 70 and connected with the air-spout B, to receive the dust-laden air therefrom through the inlet-opening e. The spout B is arranged tangentially to the separating case C, so that the dust-laden air which enters the case C from the spout B with great force and velocity assumes a circular or rotary motion in the casing C, about the axis thereof, whereby the dust particles contained in the air current are all thrown into the outer layer of the air-current against the inner-side of the casing. The air-current continues its rotative or gyrating movement in the case C until it escapes at the open end d of the case.

e represents the dust-discharge opening, consisting of a horizontal slot formed in the case C, at a suitable distance from the inlet-opening e. The rear edge, e', of the slot extends nearer the center of gyration than the front edge, so that the slot will skim off the thin layer of air and dust which is driven along the wall of the case C and discharge it into the dust chamber F.

f represents a section of bolting cloth, or other finely-perforated material, arranged in the case C and forming part of its peripheral wall. The bolting-cloth f is supported on ribs f', which divide the space behind the cloth into a number of independent chambers, g, each of which is provided with an adjustable discharge-valve g'. The very fine dust passes through the meshes of the bolting-cloth into the chambers g, and thence into a dust-chamber, F. By regulating the discharge-open-

Witnesses:
Charles B. Schmitt
Theodore L. Poston

J. M. Finch, Inventor.
By William H. Brown,
Attorney.

Figura 1: Primeira patente sobre ciclones (HOFFMANN; STEIN, 2007).

Apêndice A

Equações para Determinação das Permeabilidades via Metodologia 01



ESTE APÊNDICE apresenta o desenvolvimento para obtenção das equações para determinação da permeabilidade, conforme a metodologia 01 utilizada.

Para a Metodologia 01, foi considerado um escoamento de um fluido viscoso através de um filtro de tecido plano, em que as seguintes hipóteses são válidas:

- meio filtrante incompressível
- escoamento unidirecional.
- fluido incompressível.
- a força de interação sólido-fluido, no meio filtrante, foi descrita pela equação de *Forcheimer*.
- coordenadas planas

Equação de Darcy para a Metodologia 01

A obtenção da permeabilidade, conforme modelo de Darcy, via metodologia 01, parte da Equação A.1.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}q \quad (\text{A.1})$$

Considerando que o escoamento é unidirecional no sentido de x , a Equação A.1 pode ser reelaborada na forma da Equação A.2.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K}q \quad (\text{A.2})$$

Sendo conhecida a área de filtração do filtro (A), normal ao sentido do fluxo, a Equação A.2 fica na forma da Equação A.3, em que Q é a vazão volumétrica.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} \quad (\text{A.3})$$

O resultado da separação de variáveis e integração da Equação A.3, conforme equações A.4 e A.5, leva à Equação A.6, em que p_e e p_i são as pressões estáticas a jusante e a montante do filtro respectivamente.

$$dp = -\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} dx \quad (\text{A.4})$$

$$\int_{p_i}^{p_e} dp = \int_0^L -\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} dx \quad (\text{A.5})$$

$$p_e - p_i = -\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} L \quad (\text{A.6})$$

A Equação A.6 pode ser escrita em função da queda de pressão (Δp), conforme Equação A.7.

$$\Delta p = -\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} L \quad (\text{A.7})$$

A partir da Equação A.7, tendo os dados experimentais de queda de pressão no filtro,

em função da vazão de filtração e conhecendo a área de filtração; torna possível o ajuste linear à Equação A.7. Posteriormente, é viável determinar o coeficiente linear representado pela Equação A.8 e conseqüentemente a permeabilidade conforme a Equação A.9.

$$a = -\frac{\mu}{K}L \quad (\text{A.8})$$

$$K = -\frac{\mu}{a}L \quad (\text{A.9})$$

Equação de *Forchheimer* para Metodologia 01

A obtenção da permeabilidade, conforme modelo de *Forchheimer*, via metodologia 01, segue o mesmo procedimento para obtenção da equação via modelo de Darcy. O ponto de partida é a Equação A.10.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}q - \frac{1}{2}C_2\rho q^2 \quad (\text{A.10})$$

Considerando que o escoamento é unidirecional no sentido de x , a Equação A.10 pode ser reelaborada na forma da Equação A.11.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K}q - \frac{1}{2}C_2\rho q^2 \quad (\text{A.11})$$

Sendo conhecida a área de filtração do filtro (A), normal ao sentido do fluxo, a Equação A.11 fica na forma da Equação A.12.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} - \frac{1}{2}C_2\rho \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \quad (\text{A.12})$$

O resultado da separação de variáveis e integração da Equação A.12, conforme equações A.13 e A.14, leva à Equação A.15, em que p_e e p_i são as pressões estáticas a jusante e a montante do filtro respectivamente.

$$dp = -\left(\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} + \frac{1}{2}C_2\rho \left(\frac{Q}{A}\right)^2\right) dx \quad (\text{A.13})$$

$$\int_{p_i}^{p_e} dp = \int_0^L - \left(\frac{\mu}{K} \frac{Q}{A} + \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \right) dx \quad (\text{A.14})$$

$$p_e - p_i = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) L - \frac{1}{2} C_2 \rho L \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (\text{A.15})$$

A Equação A.15 pode ser escrita em função da queda de Pressão (Δp), conforme Equação A.16.

$$\Delta p = -\frac{\mu L}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho L \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (\text{A.16})$$

A partir da Equação A.16, tendo os dados experimentais de queda de pressão no filtro em função da vazão de filtração e conhecendo a área de filtração; torna possível o ajuste quadrático à Equação A.16. Posteriormente, é viável determinar os coeficientes linear e quadrático, representados pelas equações A.17 e A.18 respectivamente. Portanto, com tais coeficientes, é possível determinar a permeabilidade a partir da Equação A.9 e o coeficiente inercial a partir da Equação A.20.

$$b = -\frac{\mu L}{K} \quad (\text{A.17})$$

$$a = -\frac{1}{2} C_2 \rho L \quad (\text{A.18})$$

$$K = -\frac{\mu L}{b} \quad (\text{A.19})$$

$$C_2 = -\frac{2a}{\rho L} \quad (\text{A.20})$$

Apêndice B

Equações para Determinação das Permeabilidades via Metodologia 02



ESTE APÊNDICE apresenta o desenvolvimento para obtenção das equações para determinação da permeabilidade, conforme a metodologia 02 utilizada.

Para a Metodologia 02, a permeabilidade foi determinada na própria unidade experimental. Foi considerado um escoamento de um fluido viscoso através de um filtro de tecido cônico, com tomadas de pressão no topo e no vértice do tronco de cone, uma vez que a pressão externa é a pressão atmosférica, em que as seguintes hipóteses são válidas:

- meio filtrante incompressível
- escoamento unidirecional.
- fluido incompressível.
- a força de interação sólido-líquido, no meio filtrante, foram descritas pelas equações de Darcy e Forchheimer.
- A área planificada filtração é determinada conforme a figura B.1.
- foram considerados valores médios de vazão e queda de pressão

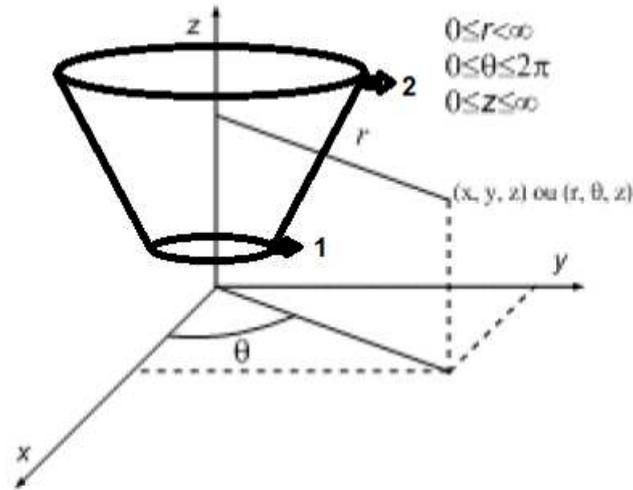


Figura B.1: Tronco de Cone em coordenadas cilíndricas

Equação de Darcy para Metodologia 02

A obtenção da permeabilidade, conforme modelo de Darcy, via metodologia 02, parte da Equação B.1.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}q \quad (\text{B.1})$$

Considerando que o escoamento é unidirecional no sentido radial (r), a Equação B.1 pode ser reelaborada na forma da Equação B.2.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \quad (\text{B.2})$$

Sendo conhecida a área planificada de filtração, no do filtro cônico (A), normal ao sentido do fluxo, a Equação B.2 fica na forma da Equação B.3.

$$dp = \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \right) dr \quad (\text{B.3})$$

O resultado da separação de variáveis e integração da Equação B.3, conforme equações B.4 e B.5, leva à Equação B.6.

$$dp = \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \right) dr \quad (\text{B.4})$$

$$\int_{p_i}^{p_{atm}} dp = \int_{r_i}^{r_e} \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \right) dr \quad (\text{B.5})$$

$$(p_{atm}) - (p_i) = \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \right) (r_e - r_i) \quad (\text{B.6})$$

A Equação B.6 pode ser escrita em função da queda de pressão média no filtro, considerada a diferença da pressão estática interna no topo e no vértice do cone ($\Delta p = p_2 - p_1$), uma vez que a pressão externa é a atmosférica e da espessura do filtro ($L = r_e - r_i$), conforme equações B.7 e B.8

$$(p_2 - p_1) = \left(-\frac{\mu L}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \right) \quad (\text{B.7})$$

$$\Delta p = -\frac{\mu L}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) \quad (\text{B.8})$$

A partir da Equação B.8, tendo os dados experimentais de queda de pressão no filtro e vazão de filtração, conhecendo a área de filtração; torna possível o ajuste linear à Equação B.7. Posteriormente, é viável determinar o coeficiente linear representado pela Equação B.9 e conseqüentemente a permeabilidade conforme B.10.

$$a = -\frac{\mu L}{K} \quad (\text{B.9})$$

$$K = -\frac{\mu L}{a} \quad (\text{B.10})$$

Equação de *Forchheimer* para Metodologia 02

A obtenção da permeabilidade, conforme modelo de Forchheimer, via metodologia 02, parte da Equação B.11.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} q - \frac{1}{2} C_2 \rho q^2 \quad (\text{B.11})$$

Considerando que o escoamento é unidirecional no sentido de radial (r), a Equação

B.11 pode ser reelaborada na forma da Equação B.12.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (\text{B.12})$$

Sendo conhecida a área de filtração do filtro cônico (A), normal ao sentido do fluxo, a Equação ?? fica na forma da Equação B.13.

$$dp = \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \right) dr \quad (\text{B.13})$$

O resultado da separação de variáveis e integração da Equação B.13, conforme equações B.14 e B.15, leva à Equação B.16.

$$\int_{p_i}^{p_{atm}} dp = \int_{r_e}^{r_i} \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \right) dr \quad (\text{B.14})$$

$$(p_{atm}) - (p_i) = \left(-\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \right) (r_e - r_i) \quad (\text{B.15})$$

A Equação B.15 pode ser escrita em função da diferença da pressão estática interna, no topo e no vértice do cone ($\Delta p = p_2 - p_1$), uma vez que a pressão externa é a atmosférica e a espessura do filtro ($L = r_e - r_i$) é constante, conforme equações B.16.

$$\Delta p = -\frac{\mu L}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho L \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (\text{B.16})$$

A partir da Equação B.16, tendo os dados experimentais de queda de pressão no filtro em função da vazão de filtração e conhecendo a área planificada de filtração; torna possível o ajuste quadrático à Equação B.16. Posteriormente, é viável determinar os coeficientes linear e quadrático representados pelas equações B.17 e B.18 respectivamente. Posteriormente, determina-se a permeabilidade pela B.19 e o coeficiente inercial pela Equação B.20.

$$b = -\frac{\mu L}{K} \quad (\text{B.17})$$

$$a = -\frac{1}{2} C_2 \rho L \quad (\text{B.18})$$

$$K = -\frac{\mu L}{b} \quad (\text{B.19})$$

$$C_2 = -\frac{2a}{\rho L} \quad (\text{B.20})$$

Apêndice C

Equações para Determinação das Permeabilidades via Metodologia 03



ESTE APÊNDICE apresenta o desenvolvimento para obtenção das equações para determinação da permeabilidade, conforme a metodologia 03 utilizada.

A metodologia 03 baseia-se na geração de uma equação para determinação da permeabilidade a partir de coordenadas esféricas, que dá origem ao cone, conforme representa a figura C.1. Nesta metodologia, foi considerado um elemento de área que varia com o ângulo do cone.

Para a Metodologia 03, a permeabilidade foi determinada na própria unidade experimental. Foi considerado um escoamento de um fluido viscoso através de um filtro de tecido cônico, com tomadas de pressão no topo (ponto 2) e no ápice do tronco de cone (ponto 1), em que as seguintes hipóteses são válidas:

- meio filtrante incompressível
- escoamento unidirecional.
- fluido incompressível.
- a força de interação sólido-líquido, no meio filtrante, foi descrita pela equação de Forcheimer.

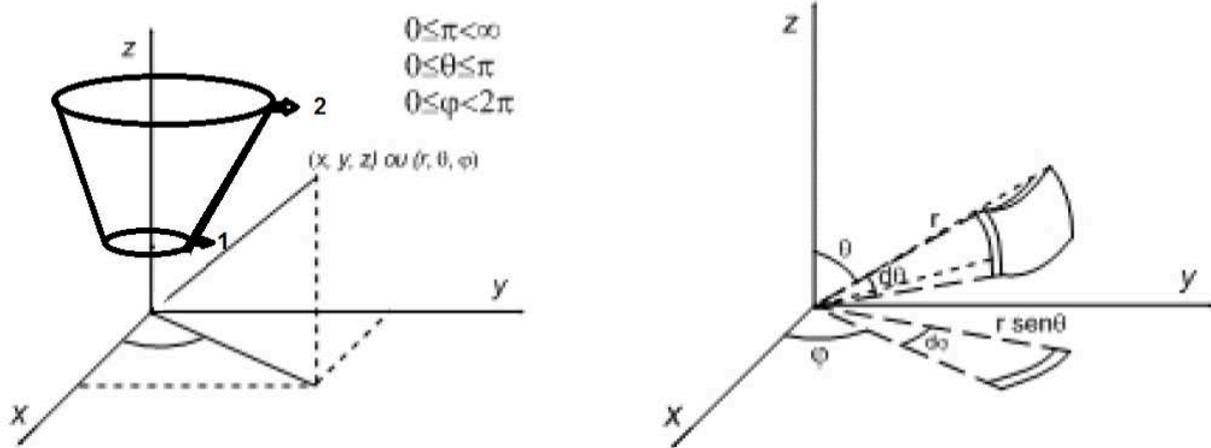


Figura C.1: Tronco de Cone em coordenadas esféricas

- coordenadas Esférica

Equação de *Forchheimer* para Metodologia 03

A equação para determinação da permeabilidade e do coeficiente inercial via metodologia 03 é somente para a equação de *Forchheimer*.

A área do filtro e uma função da geratriz do cone (r) e do angulo do cone (θ), conforme Equação C.1, com derivada representada na Equação C.2 .

$$A = \pi r^2 \text{sen} \theta \quad (\text{C.1})$$

$$dA = 2\pi r \text{sen} \theta dr \quad (\text{C.2})$$

A obtenção da permeabilidade e o coeficiente inercial, conforme modelo de Forchheimer, via metodologia 03, parte da equação C.3.

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} q - \frac{1}{2} C_2 \rho q^2 \quad (\text{C.3})$$

Considerando que o escoamento é unidirecional no sentido de θ , em coordenadas esféricas, a Equação C.3 pode ser reelaborada na forma da Equação C.4.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = -\frac{\mu}{K} q - \frac{1}{2} C_2 \rho q^2 \quad (\text{C.4})$$

A velocidade superficial de filtração é a relação entre a vazão volumétrica de filtrado (Q) e área de filtração (A). Portanto a Equação C.4 pode ser transformada na Equação C.5.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{A} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \quad (\text{C.5})$$

Sendo a área de filtração do filtro cônico e sua derivada definidos pelas equações C.1 e C.2 respectivamente, a Equação C.5 ficar na forma da Equação C.6.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{\pi r^2 \text{sen}\theta} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q}{\pi r^2 \text{sen}\theta} \right)^2 \quad (\text{C.6})$$

Simplificando, tem-se a Equação C.7

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{\pi r \text{sen}\theta} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q^2}{\pi^2 r^3 \text{sen}^2 \theta} \right) \quad (\text{C.7})$$

Sabendo que $dp = \Delta p$ e $d\theta = L$, sendo Δp a diferença entre a pressão estática interna e a pressão atmosférica externa e L a espessura do filtro, a Equação C.7 pode ficar na forma da Equação C.8.

$$\frac{\Delta p}{L} = -\frac{\mu}{K} \left(\frac{Q}{\pi r \text{sen}\theta} \right) - \frac{1}{2} C_2 \rho \left(\frac{Q^2}{\pi^2 r^3 \text{sen}^2 \theta} \right) \quad (\text{C.8})$$

Rearranjando e derivando a Equação C.8 em relação a r, tem-se a Equação C.9.

$$d\Delta p = \left(\frac{\mu Q L}{K \pi \text{sen}\theta} \frac{1}{r^2} + \frac{3 C_2 \rho Q^2 L}{2 \pi^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{1}{r^4} \right) dr \quad (\text{C.9})$$

Integrando a Equação C.9, tem-se a Equação C.10.

$$\int_{\Delta p_1}^{\Delta p_2} d\Delta p = \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{\mu Q L}{K \pi \text{sen}\theta} \frac{1}{r^2} \right) dr + \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{3 C_2 \rho Q^2 L}{2 \pi^2 \text{sen}^2 \theta} \frac{1}{r^4} \right) dr \quad (\text{C.10})$$

O resultado da integração da Equação C.10 é a Equação C.11.

$$(p_2 - p_{atm}) - (p_1 - p_{atm}) = \frac{\mu Q L}{K \pi \text{sen}\theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{C_2 \rho Q^2 L}{2 \pi^2 \text{sen}^2 \theta} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) \quad (\text{C.11})$$

Como resultado final, chega-se à Equação C.12, em que ΔP é a diferença de pressão estática entre o topo (P_2) e o ápice (P_1), do tronco de cone.

$$\Delta P = \frac{\mu L}{K\pi \text{sen}\theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) Q + \frac{C_2 \rho L}{2\pi^2 \text{sen}^2\theta} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) Q^2 \quad (\text{C.12})$$

A partir da Equação C.12, tendo os dados experimentais de queda de pressão no filtro em função da vazão de filtração; torna-se possível o ajuste quadrático à Equação C.12. Posteriormente, é viável determinar os coeficientes linear e quadrático representados pelas equações C.13 e C.14 respectivamente. Portanto, determina-se a permeabilidade pela C.15 e o coeficiente inercial pela Equação C.16.

$$b = \frac{\mu L}{K\pi \text{sen}\theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{C.13})$$

$$a = \frac{C_2 \rho L}{2\pi^2 \text{sen}^2\theta} \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right) \quad (\text{C.14})$$

$$K = \frac{\mu L}{b\pi \text{sen}\theta} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{C.15})$$

$$C_2 = \frac{2a\pi^2 \text{sen}^2\theta}{\rho L \left(\frac{1}{R_1^3} - \frac{1}{R_2^3} \right)} \quad (\text{C.16})$$

Apêndice D

Resultados Experimentais para Determinação da Permeabilidade



ESTE APÊNDICE apresenta os resultados experimentais para determinação de permeabilidade em triplicata, conforme cada tipo de metodologia adotada.

Resultados da metodologia 01

Tabela D.1: Resultados de permeabilidade: Metodologia 01.

Resultados de permeabilidade: Metodologia 01					
Exp. 01		Exp. 02		Exp. 03	
Vel. filtração (m/s)	- ΔP filtro (Pa)	Vel. filtração (m/s)	- ΔP filtro (Pa)	Vel. filtração (m/s)	- ΔP filtro (Pa)
0,27	195,9	0,27	195,9	0,36	195,9
0,63	293,8	0,54	244,9	0,54	274,2
1,08	411,4	0,99	372,2	0,99	391,8
1,71	626,8	1,44	528,9	1,53	548,5
2,26	803,1	1,90	724,8	1,90	724,8
2,80	1.038,2	2,35	901,1	2,44	901,1
3,25	1.194,9	2,98	1.136,1	2,98	1.175,3
3,70	1.430,0	3,43	1.351,6	3,34	1.410,4
3,88	1.625,9	3,88	1.586,7	3,79	1.567,1
4,42	1.841,3	4,42	1.841,3	4,24	1.782,6
4,69	2.017,6	5,05	2.056,8	5,05	2.037,2
5,32	2.135,2	5,14	2.056,8	5,23	2.233,1
5,51	2.154,8	5,60	2.409,4	5,69	2.429,0
5,60	2.409,4	5,78	2.429,0		
5,78	2.429,0	5,78	2.429,0		
6,23	2.448,6				

Resultados da metodologia 02

Tabela D.2: Resultados de permeabilidade: Metodologia 02.

Resultados de permeabilidade: Metodologia 02					
Exp. 01		Exp. 02		Exp. 03	
Vel. filtração (m/s)	- ΔP filtro (Pa)	Vel. filtração (m/s)	- ΔP filtro (Pa)	Vel. filtração (m/s)	- ΔP filtro (Pa)
0,181	97,9	0,181	97,9	0,181	97,9
0,243	156,7	0,243	137,1	0,243	156,7
0,291	195,9	0,291	176,3	0,291	176,3
0,332	215,5	0,332	205,7	0,332	205,7
0,368	244,9	0,368	235,1	0,368	244,9
0,400	274,2	0,400	264,4	0,400	274,2
0,429	303,6	0,429	293,8	0,429	313,4
0,457	323,2	0,457	323,2	0,457	323,2
0,483	342,8	0,483	342,8	0,483	342,8
0,507	372,2	0,507	362,4	0,507	362,4
0,531	382,0	0,531	382,0	0,531	372,2
0,553	401,6	0,553	391,8	0,553	401,6
0,574	421,2	0,574	411,4	0,574	411,4
0,595	431,0	0,595	431,0	0,595	431,0
0,615	450,5	0,615	440,7	0,615	440,7
0,634	460,3	0,634	450,5	0,634	460,3
0,653	479,9	0,653	470,1	0,653	470,1
0,671	489,7	0,671	489,7	0,671	489,7
0,688	509,3	0,688	499,5	0,688	499,5
0,705	519,1	0,705	514,2	0,705	519,1
0,722	528,9	0,722	528,9	0,722	524,0
0,738	548,5	0,738	548,5	0,738	528,9

Resultados da metodologia 03

Tabela D.3: Resultados de permeabilidade: Metodologia 03.

Resultados de permeabilidade: Metodologia 03					
Exp. 01		Exp. 02		Exp. 03	
Vazão filtração (m ³ /s)	- ΔP filtro (Pa)	Vazão filtração (m ³ /s)	- ΔP filtro (Pa)	Vazão filtração (m ³ /s)	- ΔP filtro (Pa)
0,015	39,2	0,068	19,6	0,071	19,6
0,025	98,0	0,106	39,2	0,106	39,2
0,033	137,2	0,141	78,4	0,138	58,8
0,040	195,9	0,176	98,0	0,173	98,0
0,046	235,1	0,199	98,0	0,196	117,6
0,052	293,9	0,225	137,2	0,228	137,2
0,058	333,1	0,255	156,7	0,255	156,7
0,063	391,9	0,277	195,9	0,280	195,9
0,068	431,1	0,299	215,5	0,299	215,5
0,073	470,2	0,318	235,1	0,318	254,7
0,077	509,4	0,338	254,7	0,338	274,3
0,082	548,6	0,360	293,9	0,360	293,9
0,086	587,8	0,379	313,5	0,379	313,5
0,090	607,4	0,399	333,1	0,399	333,1
0,094	627,0	0,419	352,7	0,419	352,7
		0,438	372,3	0,438	372,3
		0,454	391,9	0,454	391,9
		0,472	411,5	0,472	411,5
		0,489	431,1	0,489	431,1
		0,506	450,7	0,506	450,7
		0,523	470,2	0,523	470,2
		0,536	489,8	0,539	489,8
		0,552	509,4	0,552	509,4
		0,568	529,0	0,568	529,0
		0,583	548,6	0,583	548,6
		0,598	568,2	0,598	568,2
		0,613	587,8	0,613	587,8
		0,627	607,4	0,624	607,4
		0,638	627,0	0,638	627,0
		0,652	646,6	0,652	646,6

Apêndice E

Contornos dos Perfis de Pressão para o Ciclone Filtrante



ESTE APÊNDICE apresenta os gráficos de contornos para o ciclone Filtrante, conforme o planejamento composto central realizado. Os contornos são referentes ao plano XZ ($Y = 0$), utilizando o modelo de turbulência LES.

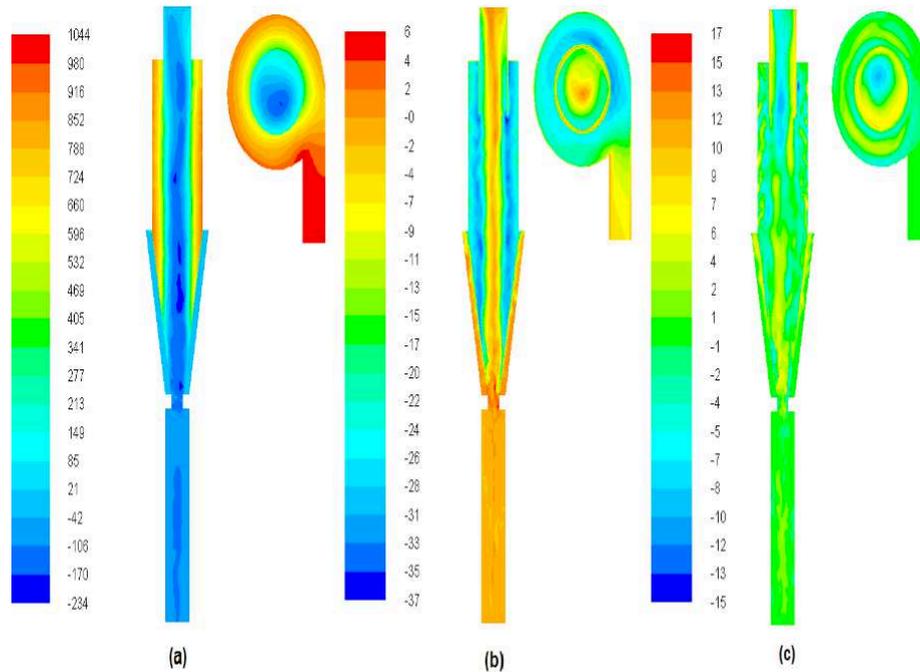


Figura E.1: Os gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 01. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

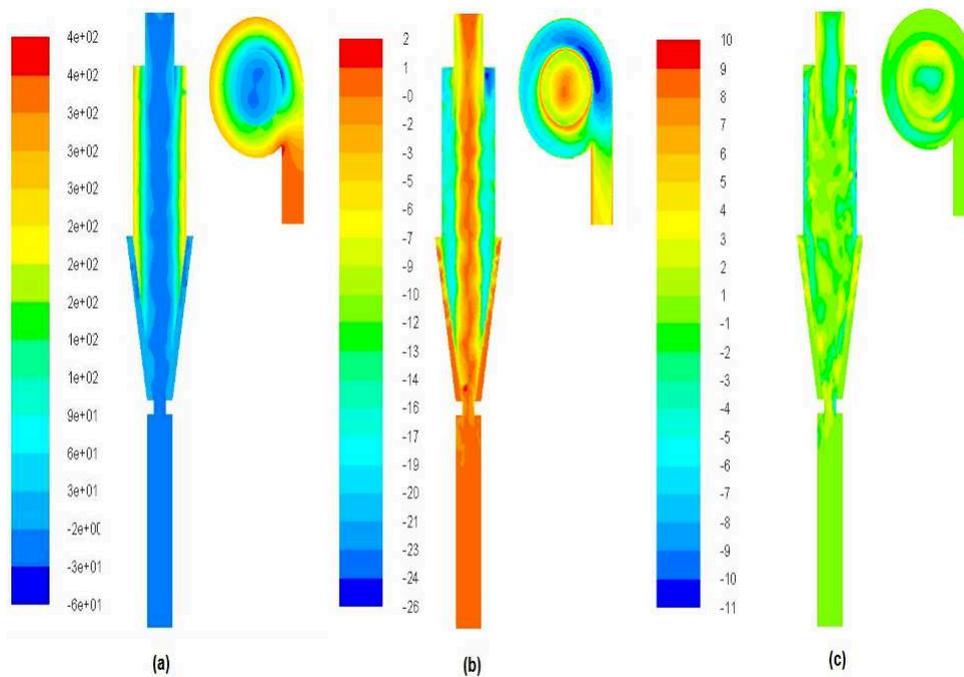


Figura E.2: Os gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 02. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

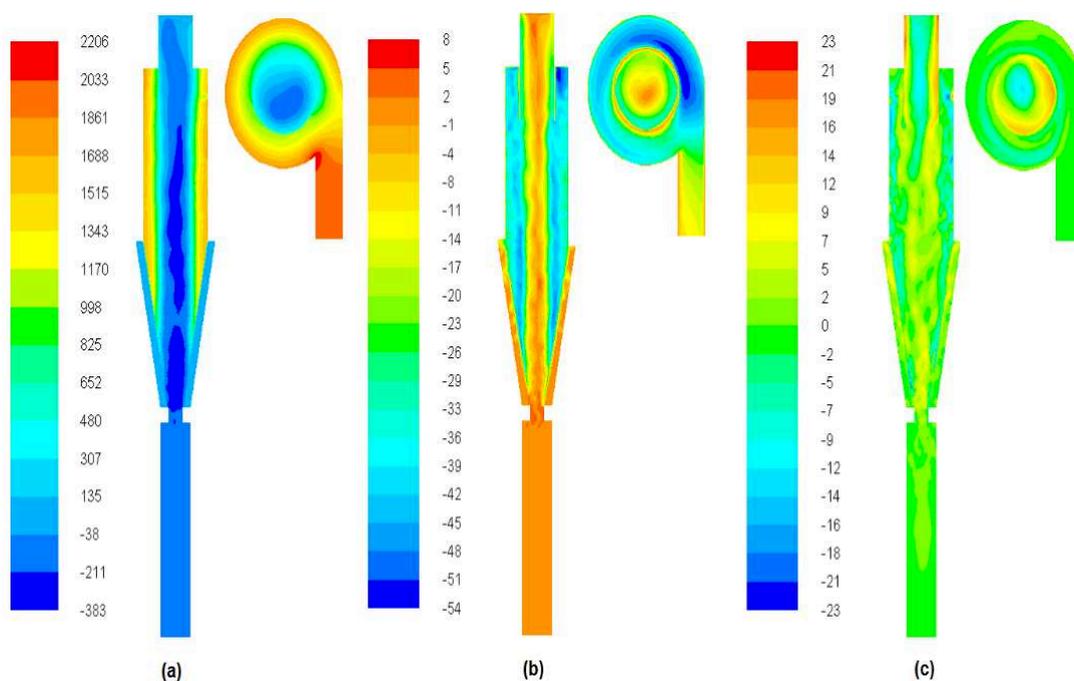


Figura E.3: Os gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 03. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

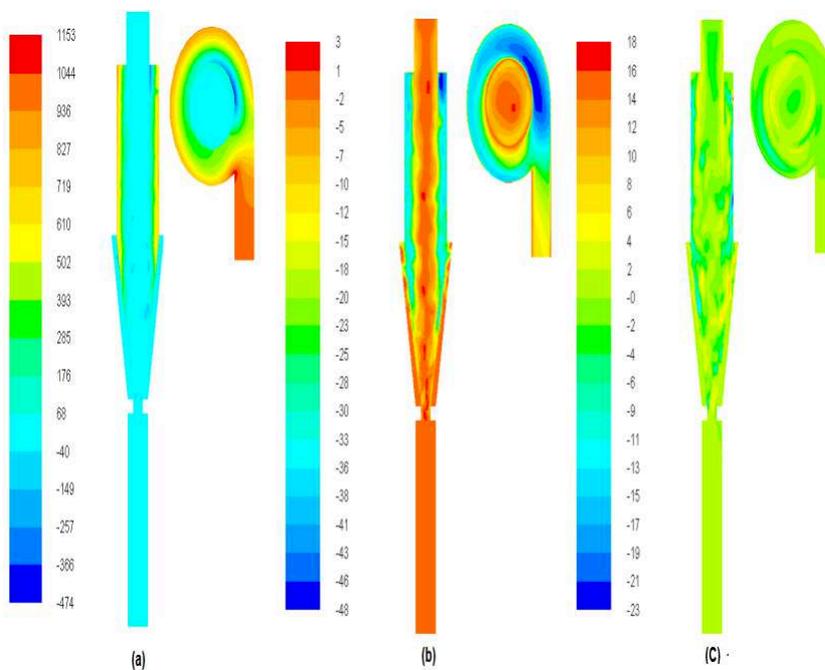


Figura E.4: Os gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 04. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

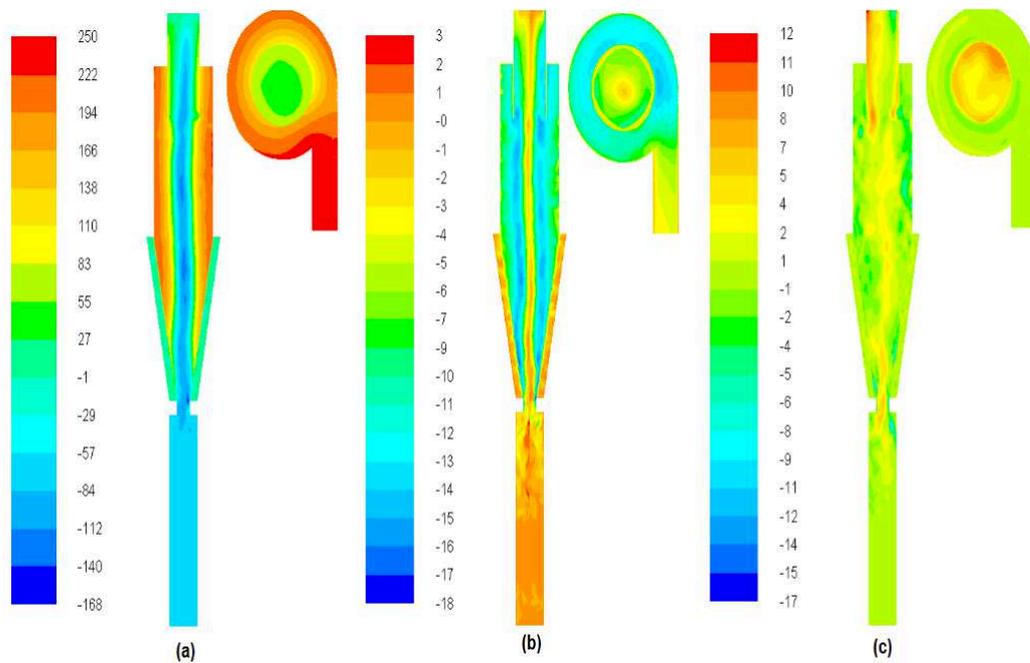


Figura E.5: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 05. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

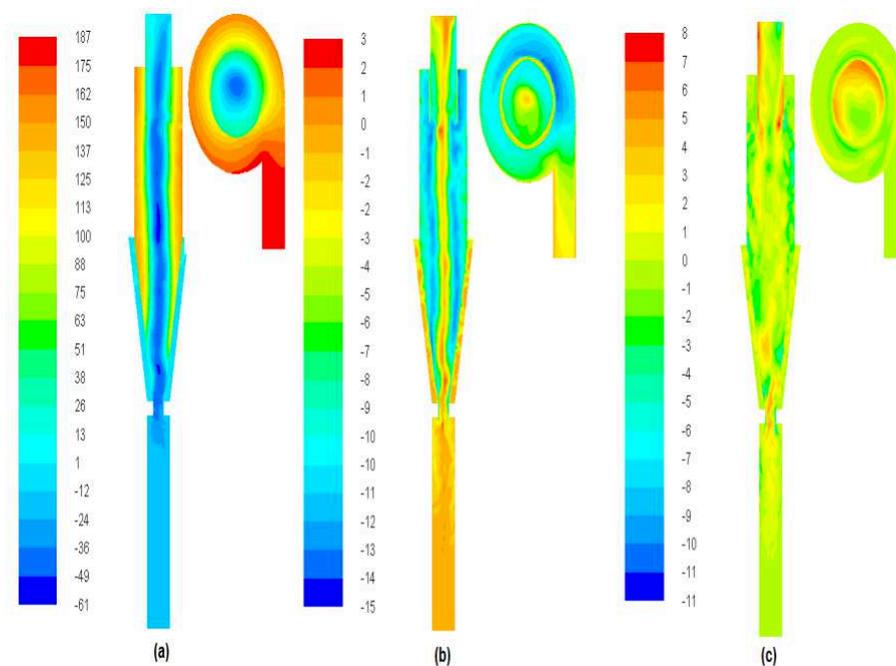


Figura E.6: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 06. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

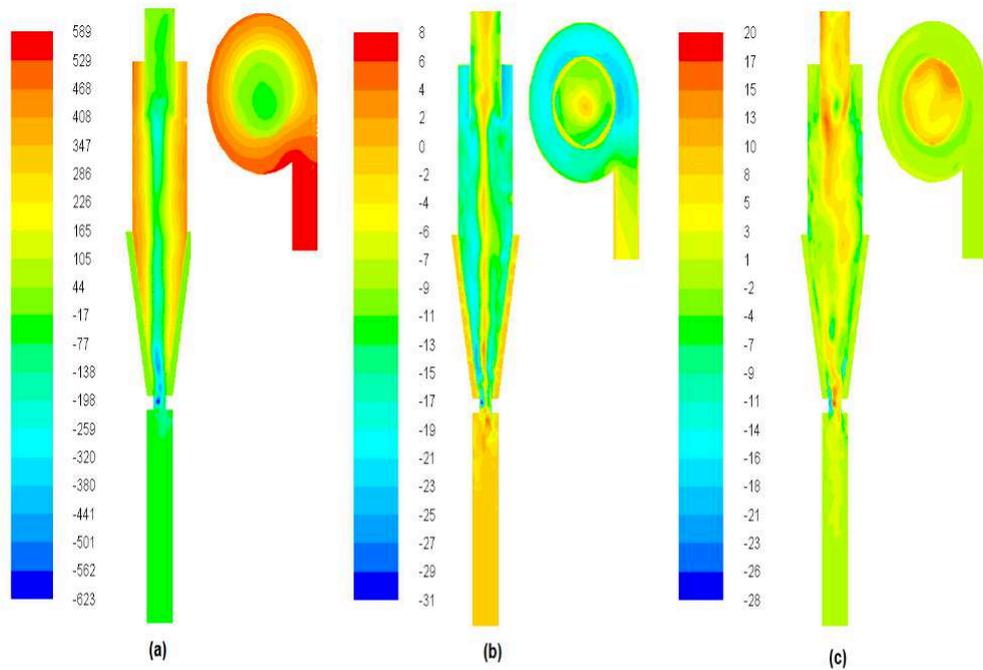


Figura E.7: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 07. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

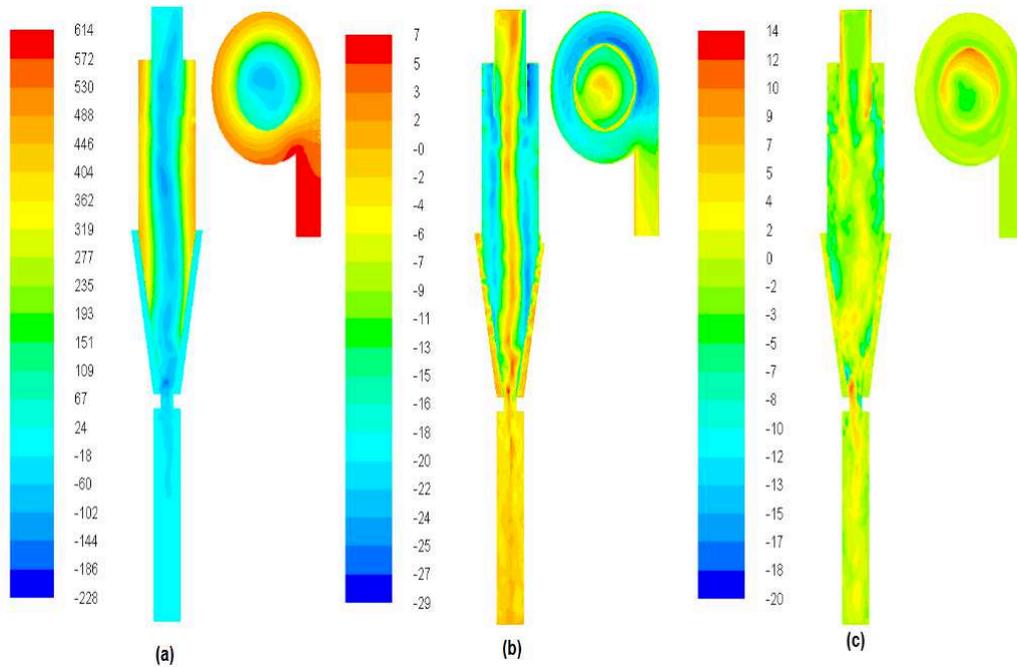


Figura E.8: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 08. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

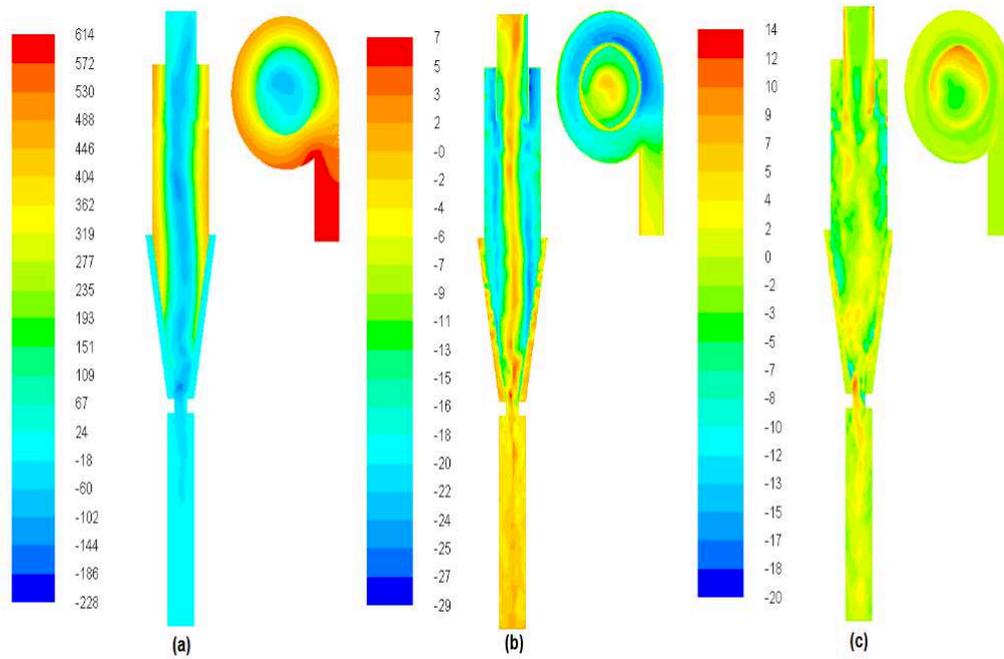


Figura E.9: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 09. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

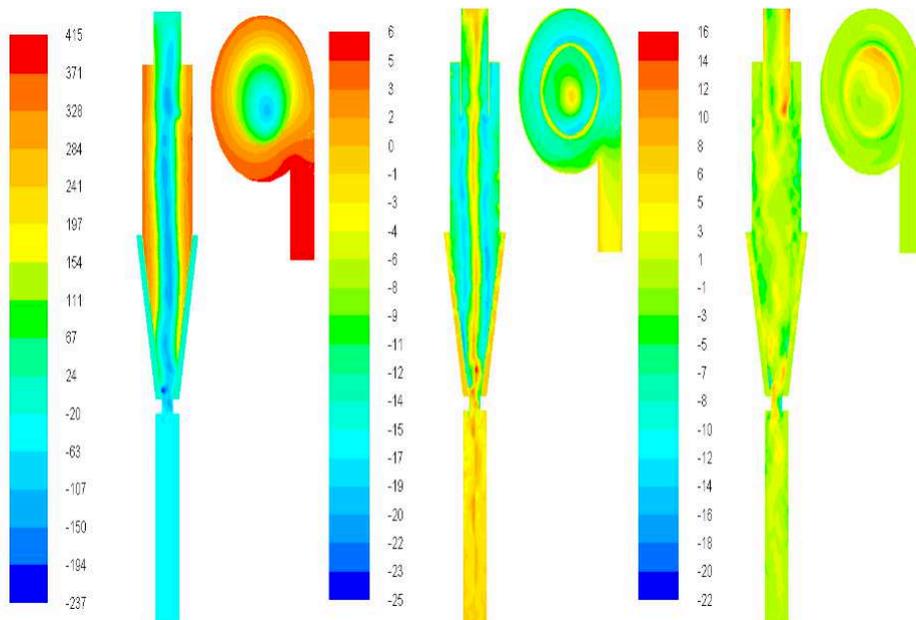


Figura E.10: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 10. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

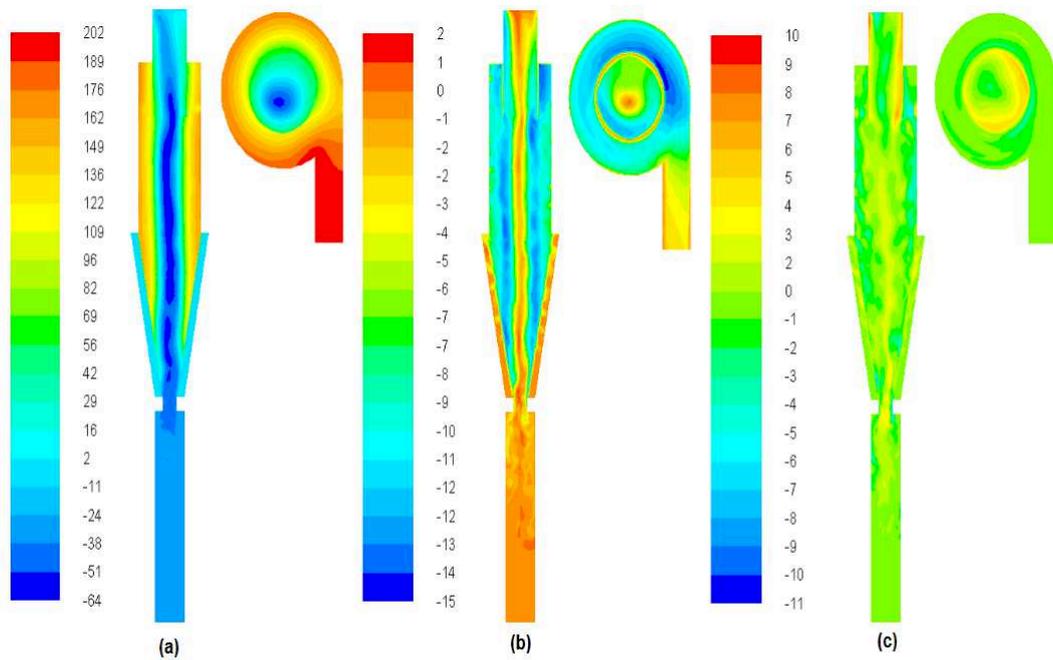


Figura E.11: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento11. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

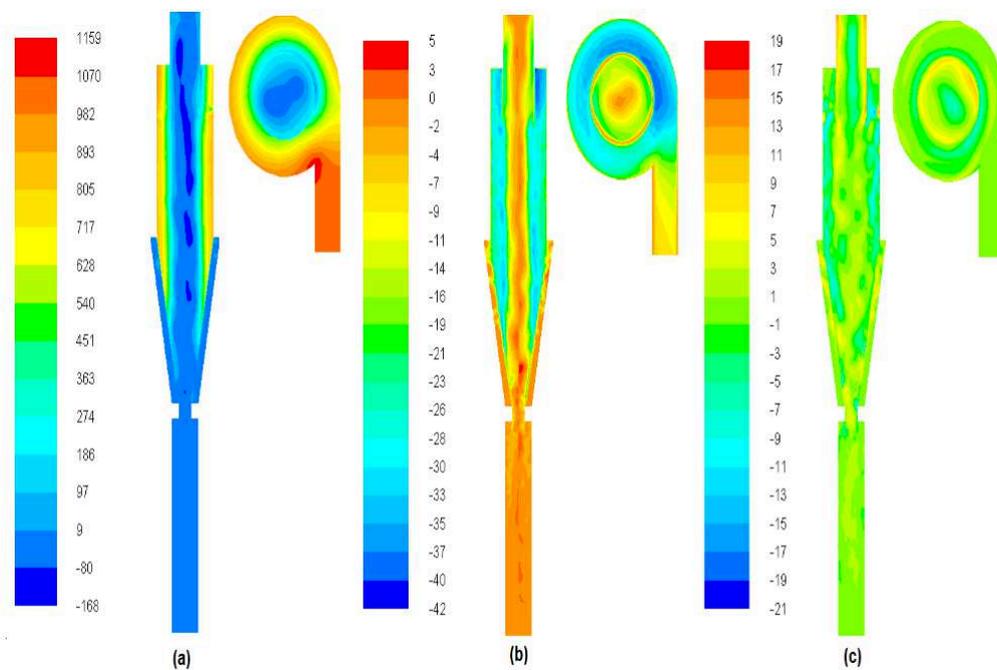


Figura E.12: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 12. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

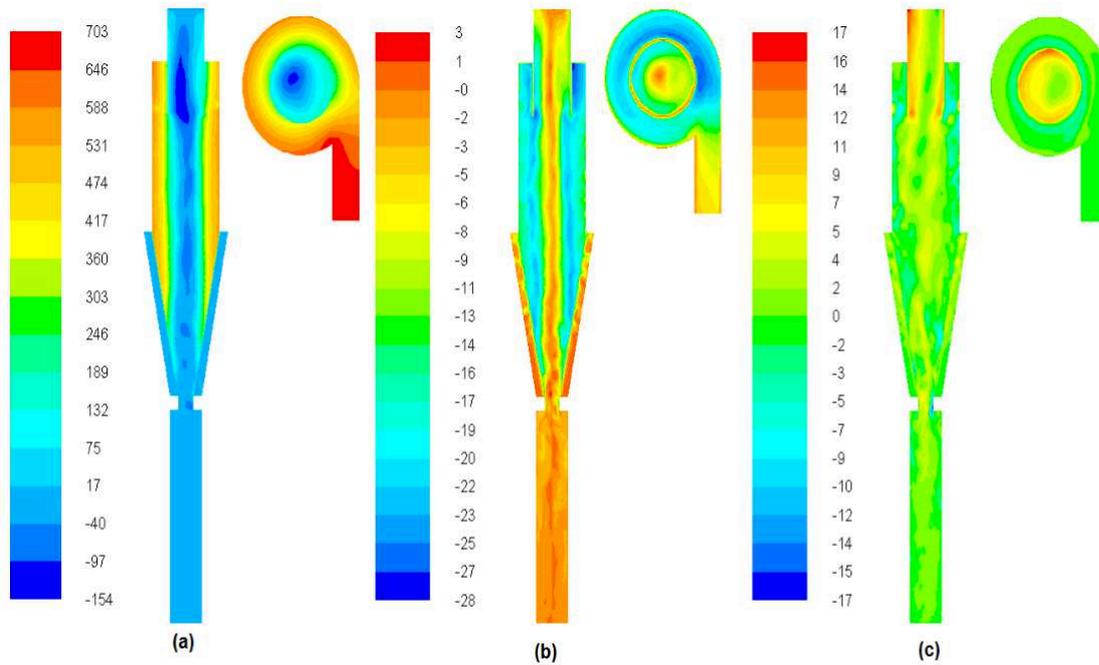


Figura E.13: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 13. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

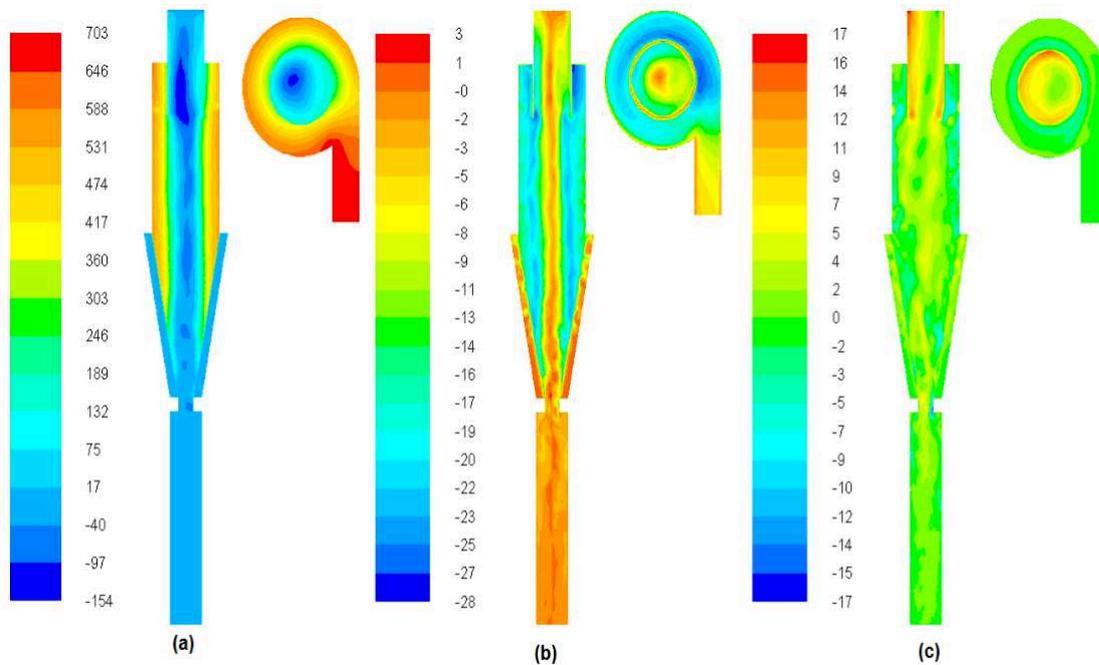


Figura E.14: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 14. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

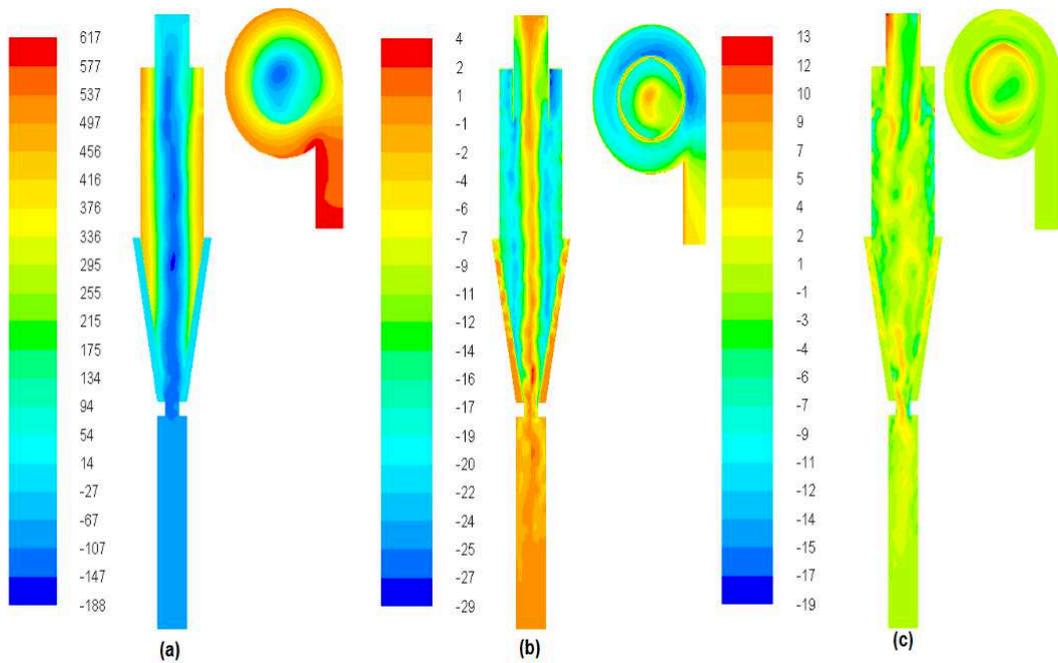


Figura E.15: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 15. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

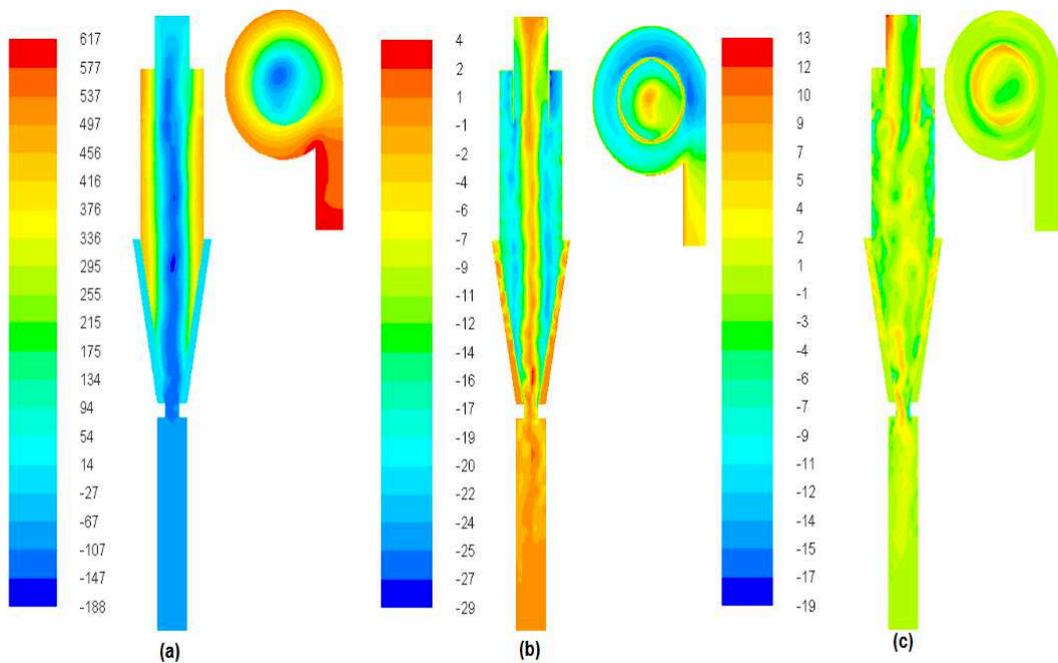


Figura E.16: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 16. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

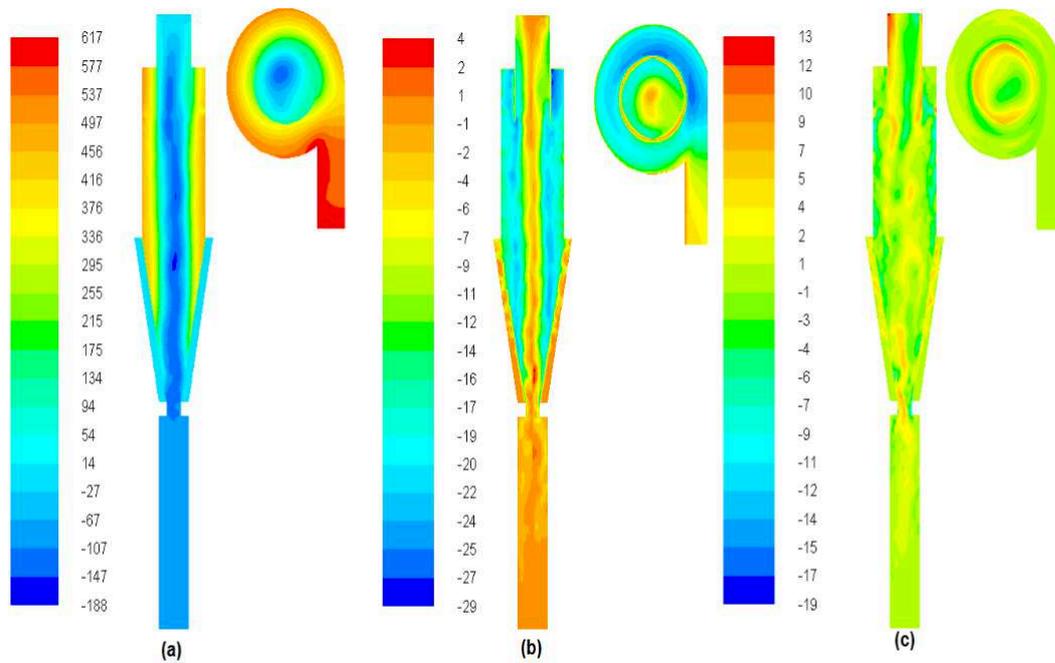


Figura E.17: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 17. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

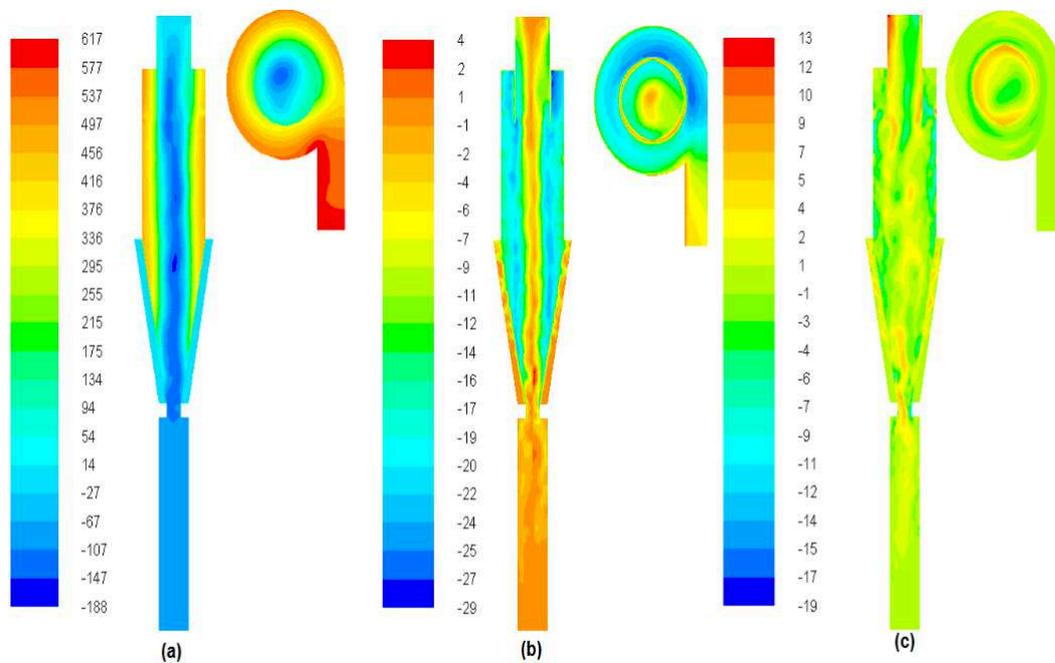


Figura E.18: Gráficos de contornos para um tempo médio na seção $Y=0$ no ciclone Filtrante do Experimento 18. (a) : pressão estática (N/m^2); (b): velocidade tangencial (m/s); (c): velocidade axial (m/s).

Apêndice F

Perfis de velocidades axiais em ciclone Filtrante

ESTE APÊNDICE apresenta os resultados numéricos para os perfis de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m, para diferentes valores da altura da alimentação, da vazão volumétrica da alimentação e da permeabilidade, estabelecidos pelo planejamento dos experimentos numéricos.

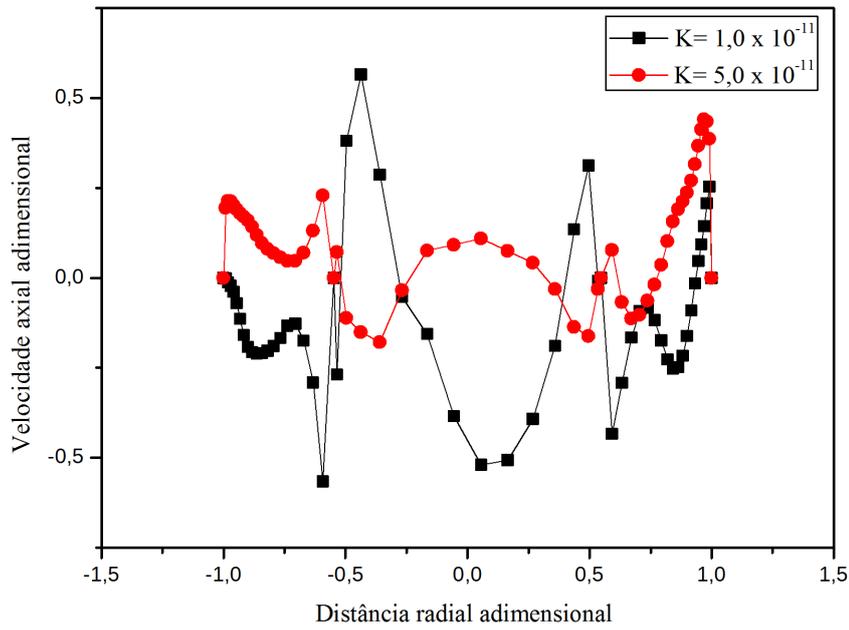


Figura F.1: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 0,057$ m.

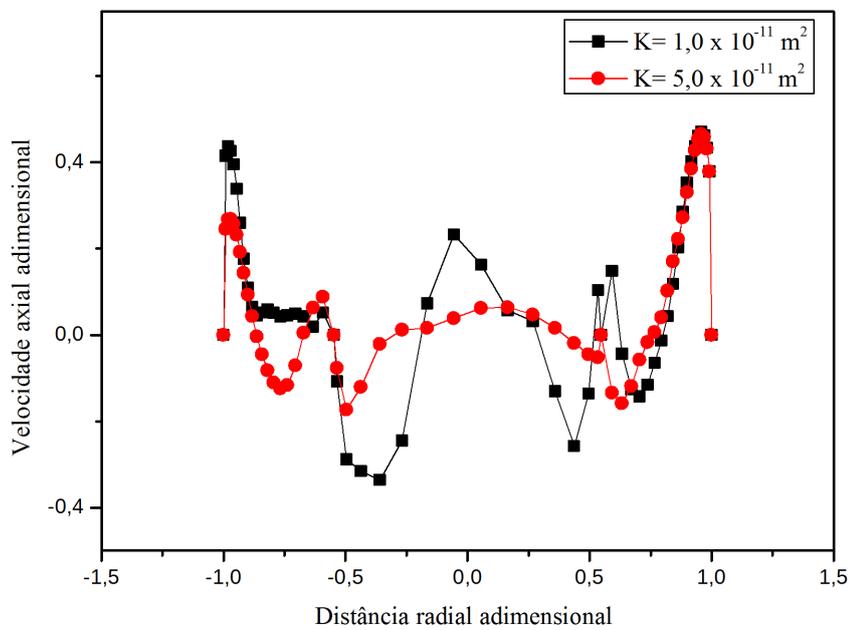


Figura F.2: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/\text{s}$ e $a = 0,057$ m.

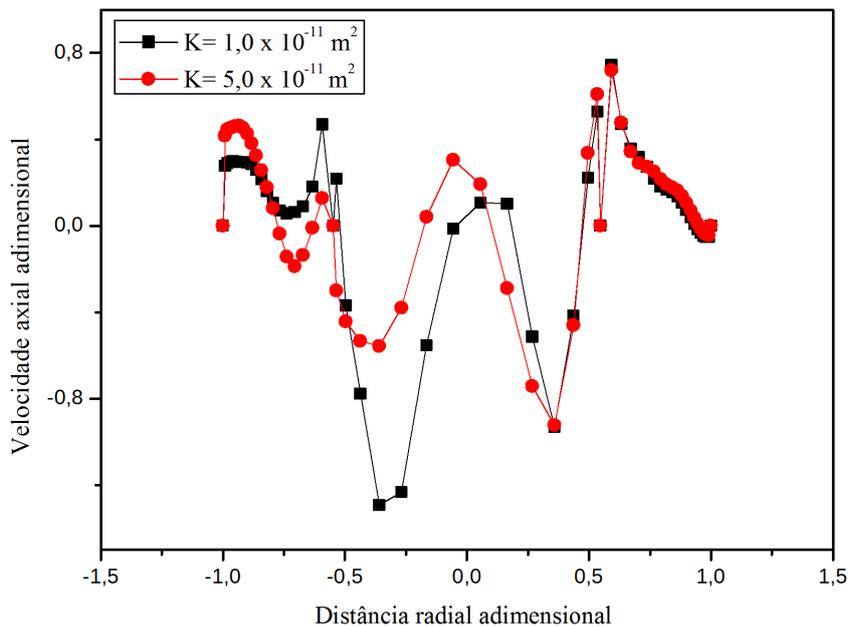


Figura F.3: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,04 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,133$ m.

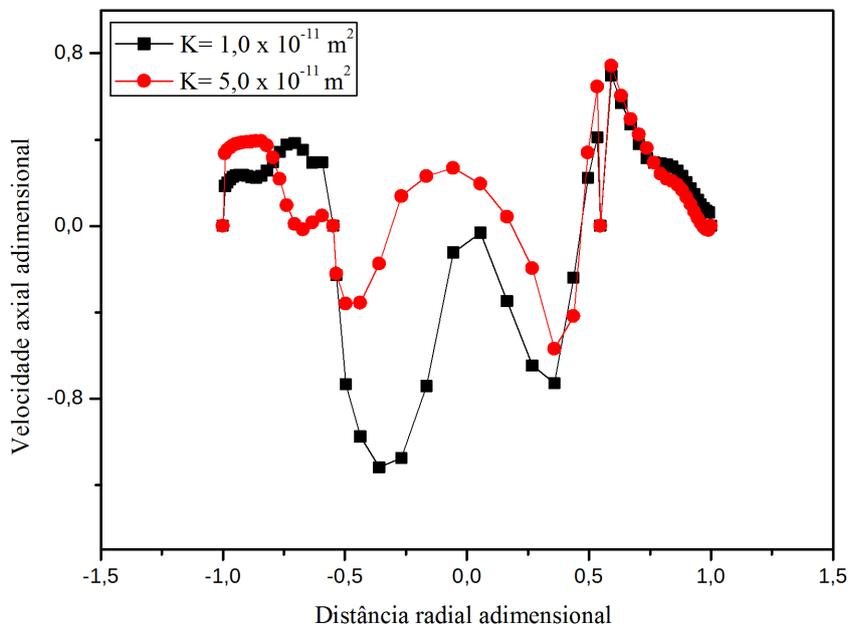


Figura F.4: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$ e $a = 0,133$ m.

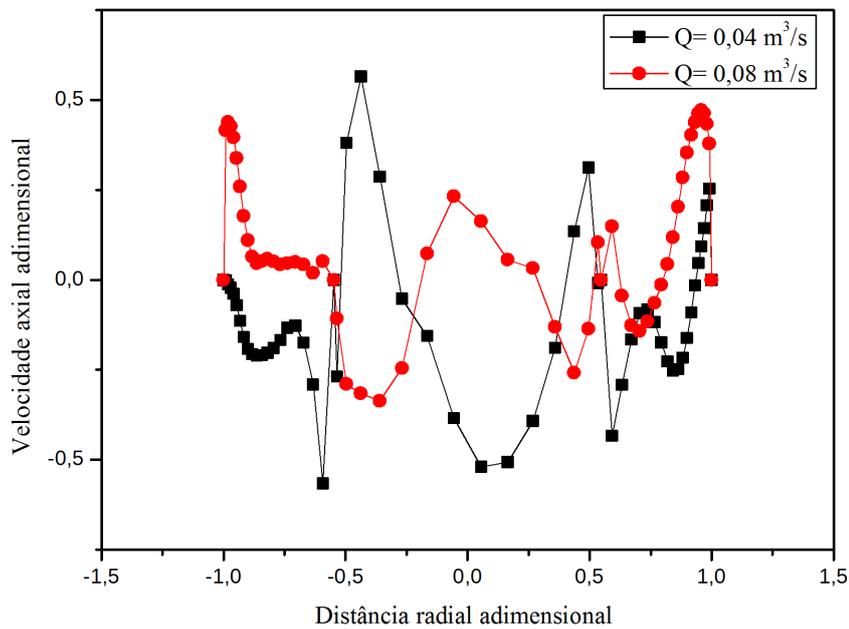


Figura F.5: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,057$ m.

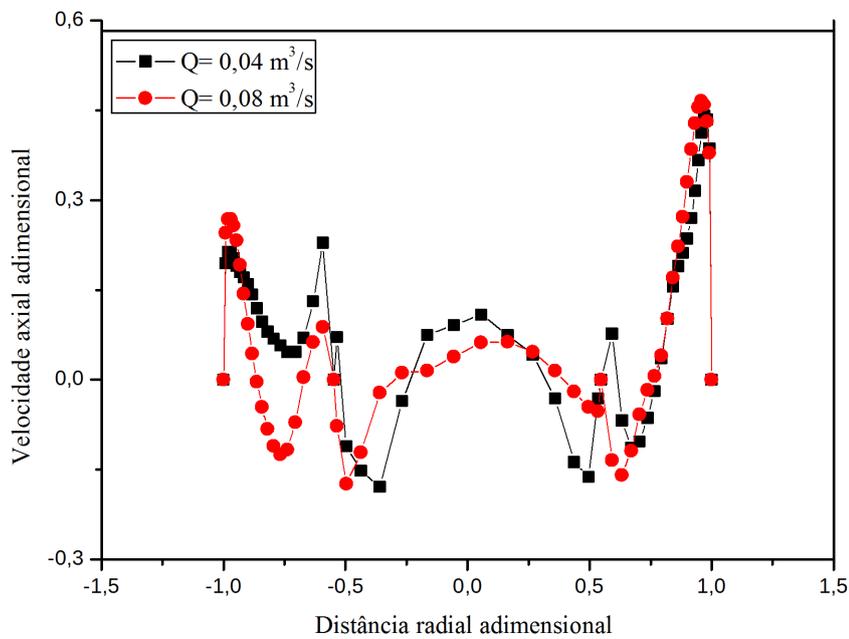


Figura F.6: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,057$ m.

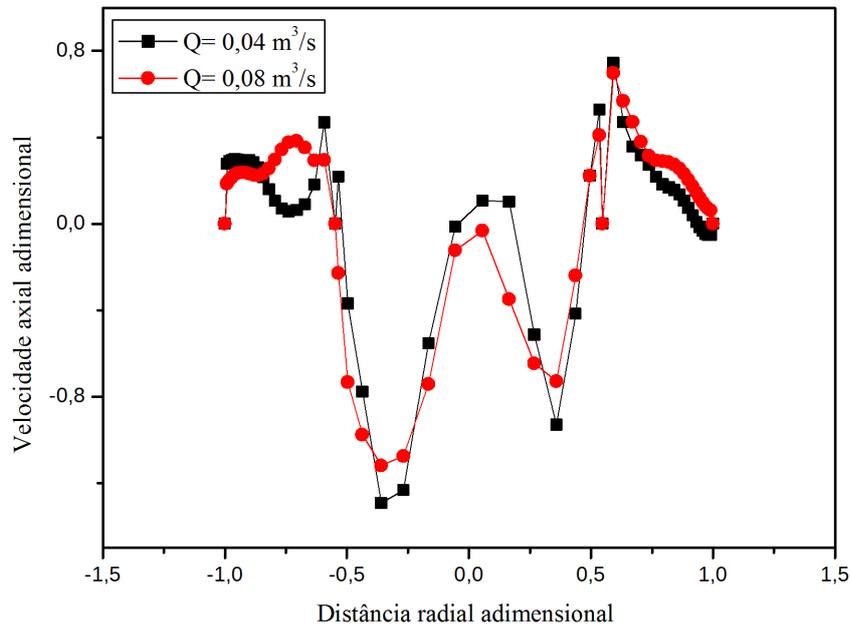


Figura F.7: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095 \text{ m}$ com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,133 \text{ m}$.

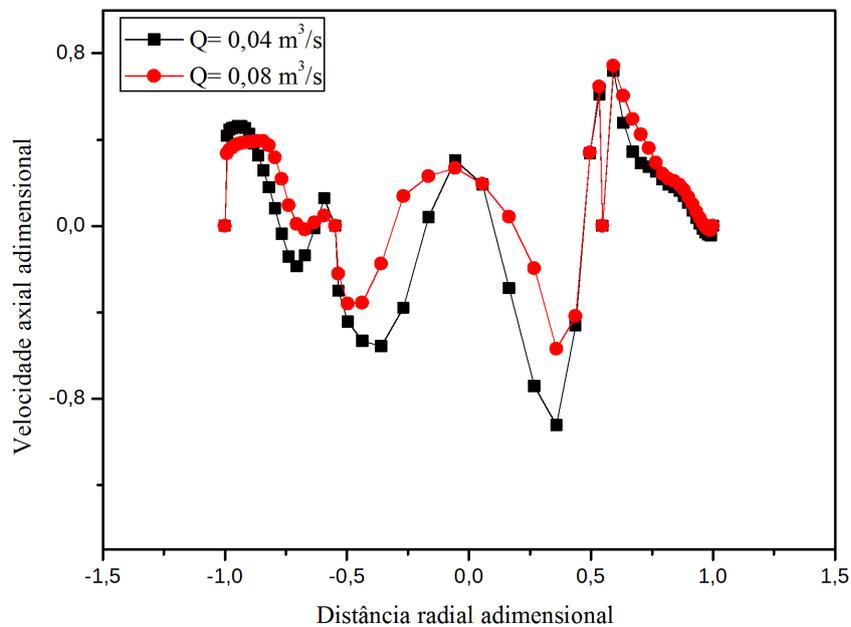


Figura F.8: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095 \text{ m}$ com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $a = 0,133 \text{ m}$.

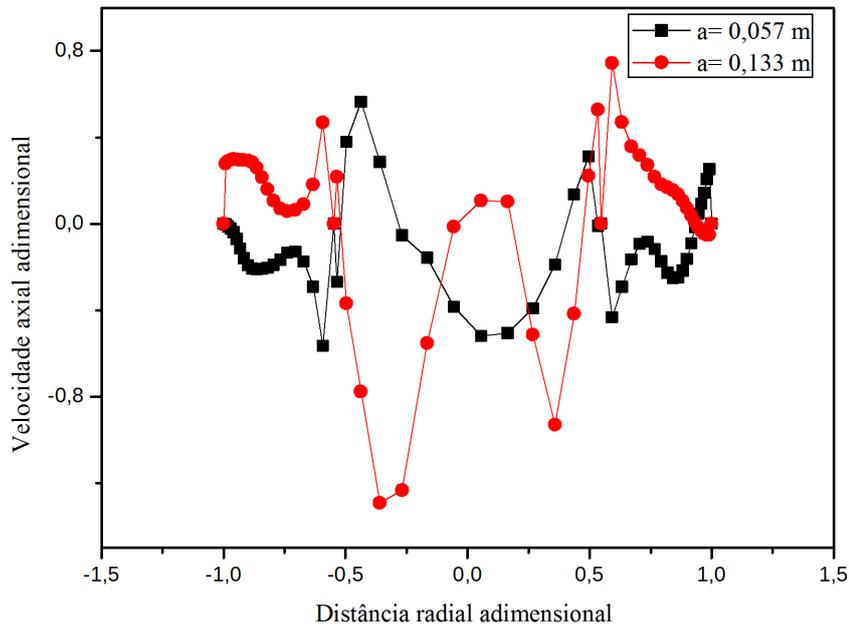


Figura F.9: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$.

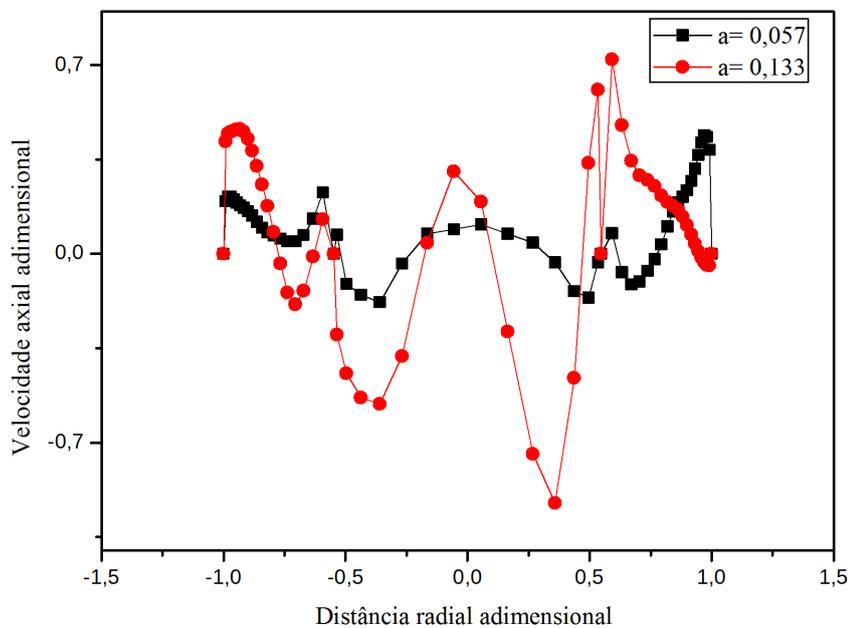


Figura F.10: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ ($Y = 0$) em $Z=1,095$ m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,04 \text{ m}^3/\text{s}$.

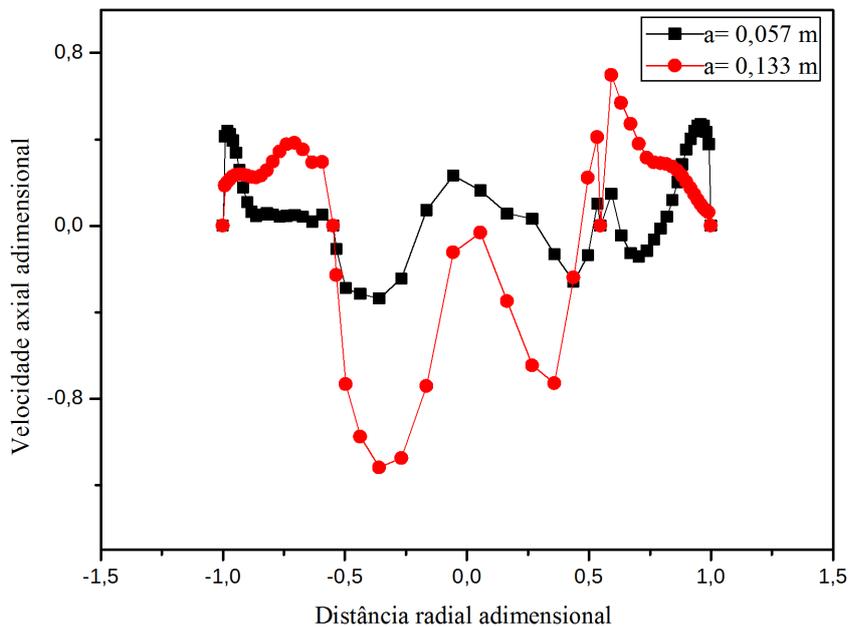


Figura F.11: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ (Y = 0) em Z=1,095 m com $K = 1,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$.

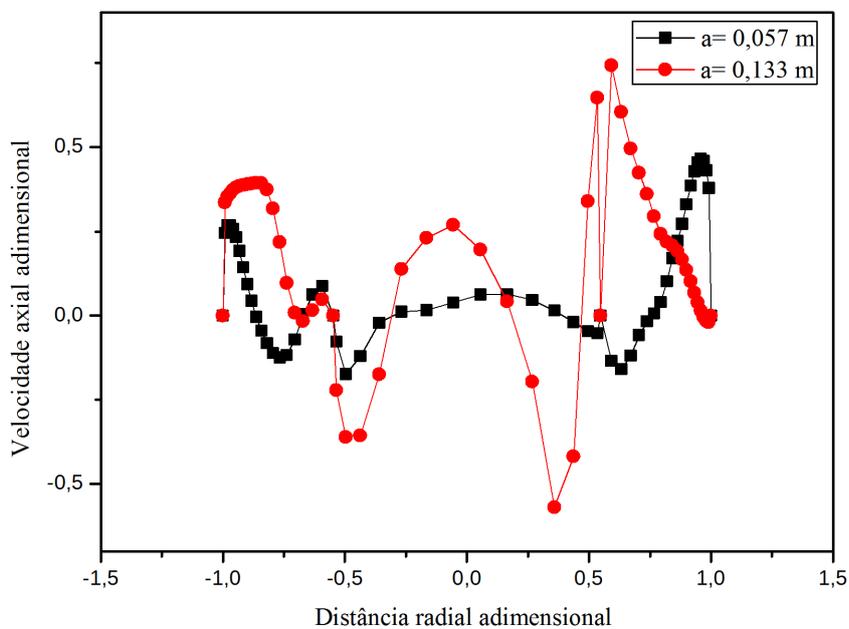


Figura F.12: Perfis radiais de velocidade axial no plano XZ (Y = 0) em Z=1,095 m com $K = 5,00 \times 10^{-11}$ e $Q = 0,08 \text{ m}^3/s$.