



**Faculdade de Engenharia Química
Departamento de Processos Químicos
Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos**

TESE DE DOUTORADO:

***“Estudo dos Escoamentos Gasoso e Gás-Sólido em Ciclones pela
Aplicação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional.”***

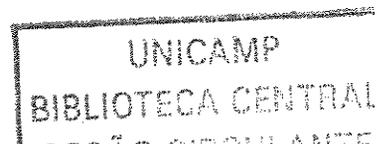
Autor: Eng. Sérgio Bernardo

Orientador: Prof. Dr. Milton Mori

Co-Orientador: Dr. Alexandre de Paula Peres

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

**Campinas-SP
Janeiro/2005**



UNIVERSIDADE BC
1ª CHAMADA UNICAMP
704562
EX _____
COMBO BC/ 62779
ROC 16.P.00026-05
D _____
RECO 11.00
ATA 23/03/05
CPD _____
Bib. id 344839

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

B456e Bernardo, Sérgio
Estudo dos escoamentos gasoso e gás-sólido em
ciclones pela aplicação de técnicas de fluidodinâmica
computacional / Sérgio Bernardo.--Campinas, SP: [s.n.],
2005.

Orientadores: Milton Mori e Alexandre de Paula
Peres.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Ciclones. 2. Simulação (Computador). I. Mori,
Milton. II. Peres, Alexandre de Paula. III. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química. IV. Título.

Titulo em Inglês: Study of gas and gas-solid flow in cyclones using computational fluid
dynamics technics.

Palavras-chave em Inglês: Cyclones, Computer simulation

Área de concentração: Desenvolvimento de processos químicos

Titulação: Doutorado

Banca examinadora: Henry França Meier, Jefferson Luiz Gomes Corrêa, Silvia
Azucena Nebra de Perez e Waldir Pedro Martignoni

Data da defesa: 28/01/2005

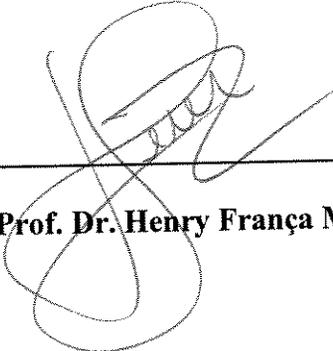
Tese de Doutorado defendida pelo Eng. Sérgio Bernardo e aprovada em 28 de Janeiro de 2005 pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Milton Mori – Orientador



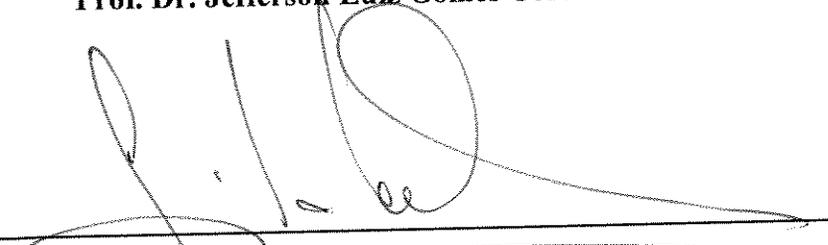
Dr. Alexandre de Paula Peres – Co-Orientador



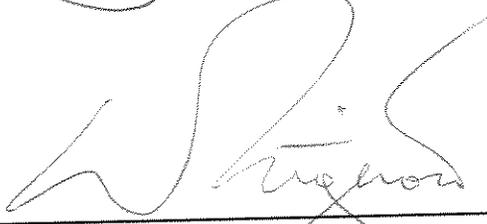
Prof. Dr. Henry França Meier - FURB



Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa – UFPB



Profa. Dra. Silvja Azucena Nebra de Perez – FEM/UNICAMP



Dr. Waldir Pedro Martignoni - PETROBRAS

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química, defendida pelo Eng. Sérgio Bernardo e aprovada em 28 de Janeiro de 2005.



Prof. Dr. Milton Mori
Orientador

“Remexo, com um pedacinho de arame, nas minhas memórias fósseis.

Tem por lá um menino a brincar no terreiro: Entre conchas, ossos de arara, pedaços de pote, sabugos de milho, asas de caçarola, etc.

E tem também um carrinho de bruços no meio do terreiro.

O menino cangava dois sapos e os botava a puxar o carrinho.

Faz de conta que ele carregava areia e pedras em seu caminhão.

O menino também puxava, nos becos de sua aldeia, por um barbante sujo, umas latas tristes.

Era sempre um barbante sujo

Eram sempre umas latas tristes.

O menino é hoje um homem doutor que trata com física quântica.

Mas tem nostalgia das latas...

Tem saudades de puxar, por um barbante sujo, umas latas tristes.

Aos parentes que ficaram lá na aldeia, esse homem doutor encomendou uma árvore torta – para caber nos seus passarinhos.

De tarde os passarinhos fazem árvore nele...”

Manoel de Barros
(Retrato do Artista quando Coisa).

Este trabalho é dedicado, integralmente, aos *Bernardo*.

A estes passarinhos que deixei lá em minha aldeia.

Por terem me construído, por me permitirem sair do ninho, ousar e voltar a eles, encontrando o mesmo amor de um irmão, a compreensão e a presença firme de um pai, mesmo em outro plano, o amor sem ressalvas de uma mãe, o sorriso gratuito dos sobrinhos, sentimentos que sempre existiram em nosso ninho e que nem mesmo o tempo ou a distância fizeram dissipar.

Não importa onde esteja, o homem doutor sempre sentirá nostalgia das latas e mais ainda de seus passarinhos. Mas seguirá em frente, porque aprendeu que o amor dos seus é gratuito, e que mesmo que ele voe cada vez mais longe, o seu ninho sempre vai existir lá em sua aldeia.....

Agradecimentos

“Todos, ao favorecerem aos outros, favorecem a si mesmos. E não me refiro ao fato de que o socorrido quererá socorrer e o defendido proteger, ou que o bom exemplo retorna, descrevendo um círculo, aquele que o dá – como os maus exemplos recaem sobre seus autores...- mas a que o valor de toda virtude tem raízes nela mesma, uma vez que não é praticada com vistas a prêmio: a recompensa da ação virtuosa é tê-la realizado...”

(Sêneca, cartas a Lucílio)

A Deus, por me fazer usar a ciência como forma de dar a minha contribuição à Sua obra, sendo, através dela, seu servo aqui na terra. Dou graças a Ti por cada um dos degraus que me concedeste o dom de galgar. Sem, contudo, parar neles, imaginando que cada um deles fosse o último.

À minha família, pela presença firme e constante durante mais estes anos de doutoramento. Pelo incentivo que sempre deram aos meus sonhos e projetos. A vocês, meus sinceros agradecimentos por caminharem ao meu lado em minhas jornadas.

A família do Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos (LMSPQ) da UNICAMP.

- A Anna Ritta, por sua presença, profissionalmente impecável, no gerenciamento do grupo, contribuindo para a concretização deste trabalho. E em particular, pela amiga que conquistei e por sua presença firme ao longo desta caminhada.
- Às grandes contribuições de Marcos A. d'Ávila, companheiro de pesquisa em CFD no LMSPQ. Agradeço pelas várias discussões que levaram à concretização dos conceitos desta tese, como também pela disponibilidade em atender às minhas dúvidas neste trabalho.
- A Dra. Graça, pela contribuição no estudo e construção de geometrias e malhas numéricas no ICEM, muitas vezes parando seu trabalho para vir ao meu socorro.

Em particular, pela grande amiga que sempre foi e que tem me acompanhado para além desta linha de pesquisa.

- Ao Leonardo, esta importante presença do grupo. Suporte no gerenciamento das minhas simulações à distância. Obrigado pela pronta disponibilidade em atender aos meus pedidos de socorro. E mais, ainda, pela grande amizade que criamos durante esta convivência.
- Ao amigos: Cleber, Daniel Ribeiro, Daniel Moreira, Fábio Kasper, Fábio Marini e Rodrigo (Boca): companheiros de pesquisa e de convivência diária. Obrigado pela paciência e pelo apoio dispensado no início dos trabalhos, quando tudo era ainda uma incerteza. Em especial, ao Renato P. Dionísio, pelas contribuições nos testes finais envolvendo a construção da geometria e da malha dos ciclones de escala industrial.
- Ao amigo, e co-orientador desta tese, Dr. Alexandre de Paula Peres. Grato pelas valiosas contribuições que culminaram na concretização deste trabalho, especialmente por sua atenção e disponibilidade, sempre pronto a atender aos meus pedidos de ajuda.

A todos os membros deste grupo, obrigado por transformar a caminhada numa agradável convivência diária.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Milton Mori, por me ensinar a aliar a forma de fazer pesquisa acadêmica com uma visão macroscópica do mundo a nossa volta, tornando a cátedra uma fonte de soluções aos problemas reais. Meus sinceros agradecimentos pelas oportunidades e pela confiança depositada em meu potencial, desde a aceitação em me orientar, até o momento atual. Serei sempre grato por isto.

À UNICAMP, através da Faculdade de Engenharia Química (FEQ), pela oportunidade e por oferecer condições para o desenvolvimento deste trabalho. Aos funcionários da FEQ, pelo conjunto de condições que tornou possível a concretização deste projeto.

À FAPESP, pelo suporte financeiro concedido através da minha bolsa de doutorado, nos três primeiros anos desta tese.

Aos amigos: Wanda, Felipe Juliana, Wesley, Karla, Wagner, Édler, Elaine, Luciana, Emerson, Mardonny e Vinícius. Companheiros de vida e da luta diária, presenças especiais dentro e fora do mundo acadêmico. A vocês, sinceros agradecimentos pela amizade que nos leva mundo a fora e que torna o “fardo” do caminho mais leve. Sem palavras para agradecê-los.

Ao meu supervisor e amigo, Waldir Martignoni, por sua disponibilidade e paciência em me atender e esclarecer as muitas dúvidas que surgiram na reta final deste trabalho.

Ao amigo Matheus Guilherme Reimann Hercket, por sua contribuição na preparação de testes de simulações, vitais na elucidação de algumas dúvidas surgidas durante a conclusão e redação da tese.

À Carolina Ludwig Quintani, por suas valiosas contribuições, modificações, inserções e correções na redação final deste trabalho. Seu senso crítico, valioso e muito exigente, foi de grande valor na confecção do trabalho.

À minha noiva, Karen. Por sua presença ao meu lado, na interminável montanha russa que foi o último ano da tese. Por partilhar comigo todas as emoções desta etapa, especialmente pela luz e pelo alento nas diversas turbulências deste caminho.

Sou grato a Ti, meu Deus, pela oportunidade em concluir mais este trabalho, tendo tanto o que agradecer a tanta gente. Aos presentes neste agradecimento como também aos anônimos, àqueles que com uma palavra ou um toque no ombro, nos corredores da FEQ ou fora dela, foram capazes de me animar e reanimar, mesmo sem saber disto. Sou grato porque aqui encerro um ciclo muito importante, no qual a técnica foi aliada à perseverança, ao exercício da paciência, ao difícil ato de mudar de idéias, de reconhecer erros, de recomeçar. A vida de um pesquisador, creio eu, deva ser assim, um constante exercício de viver, de não desanimar, de recomeçar. Sempre em frente. Sempre.

Sumário

RESUMO.....	XXIII
ABSTRACT.....	XXIV
NOMENCLATURA	XXV
CAPÍTULO 01	01
INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS CICLONES.....	01
1.1- Apresentação.....	01
1.3- Descrição do Equipamento	04
1.4-Construção Geral do Ciclone.....	13
CAPÍTULO 02	17
REVISAO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1- Apresentação.....	17
2.2- Resenha do Material Consultado	18
CAPÍTULO 03	35
OBJETIVOS	35
3.1: Objetivos Gerais.....	35
3.2: Objetivos Específicos.....	35
3.3- Estudo de Casos	37
3.3.1: Caso Yuu et al. (1978).....	38
3.3.2: Caso Patterson e Munz (1996)	38
3.3.3- Caso Patterson e Munz (1989)	39
CAPÍTULO 04	41
MODELAGEM MATEMÁTICA	41
4.1- Apresentação.....	41
4.2- O Modelo Geral de Meier (1998)	42
4.3- Características do Modelo Geral de Meier (1998).....	46
4.3.1- O Modelo Euleriano Monofásico Bidimensional (EMB)	47
4.3.2- O Modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional (EEBB).....	47
4.4 - Modelos de Turbulência	48
4.4.1- Abordagem Histórica	48
4.5- Descrição dos Modelos de Turbulência Estudados.....	51
4.5.1- O Modelo k-ε Padrão	51

4.5.2- O Modelo RSM (“Reynolds Stress Model”).....	54
4.5.3 – O Modelo LES.....	55
4.5.3.1. Modelo de Smagorinsky.....	58
4.5.4 – O Modelo DES.....	59
CAPÍTULO 05.....	61
MÉTODOS NUMÉRICOS E PACOTES COMPUTACIONAIS.....	61
5.1- Apresentação.....	61
5.2- O Método dos Volumes Finitos.....	62
5.2.1- Equação Geral de Discretização.....	64
5.2.2- Os Esquemas de Interpolação.....	70
5.3- Acoplamento Pressão-Velocidade.....	73
5.4- Algoritmos de Resolução de Sistemas Lineares.....	74
5.4.1- Métodos Básicos:.....	75
5.5- Os Pacotes Computacionais.....	76
5.5.1- Introdução à Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	77
5.5.2- O Código Computacional FLUENT.....	77
5.5.2.1- Características do Programa.....	77
5.5.3- O Código Computacional CFX.....	78
5.6- Pacotes Comerciais para construção de Geometrias e Malhas Numéricas.....	81
5.6.1- O Pacote ICEM CFD Hexa.....	81
5.6.2- O Pacote GAMBIT.....	82
5.7- Geometrias e Malhas Numéricas.....	82
5.8 – Justificativa de uso de dois Softwares para o Desenvolvimento dos Trabalhos.....	84
CAPÍTULO 06.....	87
RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EXPERIMENTOS NUMÉRICOS PARA O	
ESCOAMENTO DO GÁS EM CICLONES.....	87
6.1 – Apresentação.....	87
6.2- Estratégia de Solução: A Escolha da Malha para a Realização dos Exp. Numéricos.....	88
6.3- Análise do escoamento do Gás nos Ciclones Estudados.....	90
6.3.1 – Estudo de Casos.....	91
6.3.1.1- YUU <i>et al.</i> (1978).....	91
6.3.1.1.1- Caso 02 – Velocidade do Ar de Entrada: $v = 9.8$ m/s.....	91
6.3.1.1.2- Caso 03 – Velocidade do Ar de Entrada: $v = 13.4$ m/s.....	98
6.3.1.2- Patterson e Munz (1996).....	103

6.3.1.2.1- Caso 01 - velocidade do ar de entrada: $v = 15.2$ m/s.....	103
6.4- Avaliação da Mudança de Parâmetros Geométricos na Fluidodinâmica dos Ciclones.	109
6.4.1 – Apresentação	109
6.4.2- Estudo da Influência do Ângulo da Seção de Entrada na Fluidodinâmica do Escoamento 1 em Ciclones de Bancada.	110
6.4.2.1- Inclinação de 45^0 na Seção de Entrada do Ciclone Descrito por Patterson e Munz (1996)	110
6.4.2.1.1- Resultados para o Escoamento do Gás.....	112
6.4.2.2- Inclinação de 30^0 na Seção de Entrada do Ciclone Descrito por Patterson e Munz (1996)	119
6.4.2.2.1- Resultados para o Escoamento do Gás.....	121
CAPÍTULO 07	125
RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM CICLONES.....	125
7.1 – Apresentação	125
7.2- A Abordagem Euleriana-Euleriana.....	126
7.3 – Estudo de Caso 04: Yuu et al. (1978).....	126
7.3.1- Avaliação do desempenho do ciclone para o estudo de caso 04	139
7.4 – Estudo de Caso 05: Patterson e Munz (1989)	140
7.4.1- Avaliação do desempenho do ciclone para o estudo de caso 05	145
7.5- Análise da Trajetória das Partículas.....	146
CAPÍTULO 08	149
AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO NOS CICLONES COM MODIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS	149
8.1- Apresentação.....	149
8.2- Resultados do Escoamento Gás-Sólido para a Proposta de Inclinação de 45^0 no Ciclone Patterson e Munz (1989).	150
8.2.1-Resultados obtidos com o modelo RSM	150
8.2.1.1- Avaliação do desempenho do ciclone	154
8.2.2- Resultados obtidos com o modelo LES	155
8.2.2.1- Apresentação dos Perfis de Velocidade	156
8.2.3- Resultados obtidos com o modelo DES	160
8.2.3.1- Apresentação dos Perfis de Velocidade	160
8.2.3.2- Avaliação do desempenho do ciclone	165

8.3- Resultados do Escoamento Gás-Sólido para a Proposta de Inclinação de 30° na Seção de Entrada do Ciclone Patterson e Munz (1989).	168
8.3.1- Apresentação dos Perfis de Velocidade	168
8.3.2- Avaliação do desempenho do ciclone	171
8.4 – Avaliação do Ciclone Patterson e Munz (1989) com diâmetro do finder de 25.4 mm.	172
8.5- Análise da Trajetória das Partículas.....	177
CAPÍTULO 09	179
AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA INCLINAÇÃO DA SEÇÃO DE ENTRADA EM CICLONES DE ESCALA INDUSTRIAL.....	179
9.1- Apresentação.....	179
9.2- Características Geométricas do Sistema em Estudo	180
9.3- Simulação do Escoamento do Gás.....	182
9.4- Simulação do Escoamento Gás-Sólido	185
9.4-1-Parâmetros de Desempenho dos Equipamentos	192
9.5- Análise da Trajetória das Partículas para os Ciclones Estudados	194
CAPÍTULO 10	201
CONCLUSÕES.....	201
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	205
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	207
ANEXOS.....	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Representação esquemática de um ciclone.	5
Figura 1.2: Ciclone e suas características fenomenológicas (Fonte: Ogawa, 1997).....	7
Figura 1.3: Regiões características no escoamento em um ciclone (Fonte: Patterson and Munz, 1996).....	9
Figura 1.4: Três tipos de duto de entrada introduzindo o escoamento do gás, tangencialmente, ao ciclone (Fonte: Barth, 1956).....	14
Figura 1.5: Ilustração esquemática do ciclone de Ter Linden e suas notações principais (Fonte: Ter Linden, 1949).	15
Figura 5.1: Representação genérica de um volume de Controle (Meier, 1998).	64
Figura 5.2: Geometrias e malhas dos casos estudados: Figuras (a) e (b) correspondem aos casos 02 e 03, e as Figuras (c) e (d) correspondem ao caso 01.....	83
Figura 6.1: Perfis de velocidade para o caso 02, obtidos a partir dos dois pré-processadores estudados, e os dados experimentais de Yuu et al. (1978).	89
Figura 6.2: Distribuição da velocidade total do gás para o caso 02.....	93
Figura 6.3: Distribuição da velocidade tangencial do gás - Caso 02.....	93
Figura 6.4: Mapeamento do campo de velocidade total do gás - Caso 02.....	94
Figura 6.5: Mapeamento do campo de velocidade tangencial do gás - Caso 02.	94
Figura 6.6: Mapeamento do campo de pressão - Caso 02 (dimensões em Pa).	96
Figura 6.7: Perfil de velocidade tangencial para o caso 02: Comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.....	97
Figura 6.8: Distribuição da velocidade total do gás - Caso 03.	99
Figura 6.9: Distribuição da velocidade tangencial do gás - Caso 03.....	99
Figura 6.10: Mapeamento do campo de Pressão - Caso 03.	100
Figura 6.11: Perfil de velocidade tangencial para o caso 03: Comparação entre os resultados numéricos e os experimentais.....	101
Figura 6.12: Comparação entre experimentos numéricos envolvendo o trabalho de Peres et al. (2002-a) e o caso 02 desta pesquisa.	102
Figura 6.13: Comparação entre resultados envolvendo o trabalho de Peres et al. (2001), Yuu et al.(1978) e o caso 03 desta pesquisa.	102
Figura 6.14: Mapeamento do campo de velocidade tangencial do gás - Caso 01.	105
Figura 6.15: Mapeamento do campo de velocidade axial do gás - Caso 01.....	105
Figura 6.16: Mapeamento do campo de velocidade radial do gás - Caso 01.....	107

Figura 6.17: Mapeamento do campo de Pressão - Caso 01.	107
Figura 6.18: Perfil de velocidade tangencial para o caso 01: comparação entre os resultados numéricos e os experimentais.....	111
Figura 6.19: (A) Malha numérica para o caso Patterson and Munz (1996) e (B) Malha Numérica para o caso em estudo (inclinação de 450 na entrada).....	111
Figura 6.20: Distribuição do componente de velocidade tangencial (Patterson and Munz (1996)).	113
Figura 6.21: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 2,75$ m/s).	113
Figura 6.22: Distribuição da velocidade axial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 2,75$ m/s).	114
Figura 6.23: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 7,75$ m/s).	114
Figura 6.24: Distribuição da velocidade axial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 7,75$ m/s).....	115
Figura 6.25: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 15,2$ m/s).....	115
Figura 6.26: Mapeamento do campo de velocidade total para as soluções numéricas: (a) entrada inclinada (b) Peres et al. (2002), ambas para $v = 2,75$ m/s.....	117
Figura 6.27: Mapeamento do campo de velocidade tangencial para as soluções numéricas: (a) entrada inclinada (b) Peres et al. (2002), ambas para $v = 2,75$ m/s.....	117
Figura 6.28: Mapeamento do campo de pressão para as soluções numéricas: (a) entrada inclinada (b) Peres et al. (2002), ambas para $v = 2,75$ m/s.	118
Figura 6.29: Malhas numéricas dos ciclones estudados: (A) entrada tangencial normal; (B) entrada inclinada em 30°; (C) entrada inclinada em 45°.	120
Figura 6.30: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 2,75$ m/s).....	121
Figura 6.31: Mapeamento do campo de velocidade média para as soluções numéricas: (A) entrada inclinada de 30° (B) entrada inclinada de 45°, ambas para $v = 2,75$ m/s.....	123
Figura 6.32: Mapeamento do campo de velocidade tangencial: entrada inclinada de (A) 45° (B) 30°, ambas para $v = 2,75$ m/s.....	123
Figura 6.33: Mapeamento do campo de pressão: entrada inclinada de (a) 45° (b) 30°, ambas para $v = 2,75$ m/s.	124
Figura 7.1: Perfil de velocidade tangencial do gás na presença de sólidos para o caso 04, usando o modelo RSM.....	128
Figura 7.2: Perfil de velocidade tangencial do gás, na presença de sólidos, para o caso 04: avaliação da influência da viscosidade do sólido.	130
Figura 7.3: Perfil de velocidade tangencial para a fase gasosa na presença da fase sólida para o caso 04, utilizando modelo LES.	131
Figura 7.4: Perfil de velocidade tangencial para a fase gasosa na presença da fase sólida para o caso 04, utilizando os modelos RSM e LES em malha refinada.	132

Figura 7.5: Perfis de velocidade tangencial para a fase gasosa (escoamento monofásico e bifásico), utilizando modelo RSM, para o caso 04.....	133
Figura 7.6: Mapeamento do campo de velocidade tangencial da fase gasosa em presença da fase sólida para o caso 04: (A) Modelo RSM; (B) Modelo LES.....	134
Figura 7.7: Mapeamento do campo de velocidade tangencial da fase gasosa para o caso 04: (A) Escoamento monofásico; (B) Escoamento Bifásico.....	134
Figura 7.8: Mapeamento do campo de velocidade axial da fase gasosa em presença da fase particulada para o caso 04.....	136
Figura 7.9: Mapeamento do campo de pressão para o caso 04: (A) Escoamento Monofásico; (B) Escoamento Bifásico.....	136
Figura 7.10: Mapeamento do campo de fração volumétrica para a fase sólida – Caso 04.....	138
Figura 7.11: Mapeamento do campo de velocidade axial da fase sólida- Caso 04.....	138
Figura 7.12: Mapeamento do campo de velocidade tangencial da fase gasosa para o caso 05. Modelo RSM.....	142
Figura 7.13: Mapeamento do campo de pressão para o caso 05 –Modelo RSM.....	142
Figura 7.14: Perfil de distribuição da velocidade tangencial para os escoamentos bifásico e monofásico para o caso 05- Modelo RSM.....	144
Figura 7.15: Mapeamento do campo de distribuição da fração volumétrica da fase sólida para o caso 05 – modelo LES.....	145
Figura 7.16: Trajetória da partícula no interior do ciclone Yuu et al. (1978).....	147
Figura 7.17: Trajetória das partículas para o caso Patterson e Munz (1989).....	147
Figura 8.1: Perfis de velocidade tangencial do gás para o ciclone com entrada inclinada - velocidade inicial de 2,75m/s.....	150
Figura 8.2: Perfis de velocidade tangencial do gás para o ciclone com entrada inclinada - velocidade inicial de 7,75 m/s.....	151
Figura 8.3: Perfis de velocidade tangencial do gás no ciclone com entrada inclinada - velocidade inicial de 15,2 m/s.....	151
Figura 8.4: Mapa de velocidade tangencial do gás, na presença da fase sólida, onde (a) $v = 2,75$ m/s e (b) $v = 7,75$ m/s.....	153
Figura 8.5: Mapa de velocidade axial do gás, na presença da fase sólida, onde (a) $v = 2,75$ m/s e (b) $v = 7,75$ m/s.....	153
Figura 8.6: Perfil de velocidade tangencial do gás no ciclone modificado. Efeito comparativo de vários modelos.....	156
Figura 8.7: Mapeamento do campo de velocidade do gás -(A) tangencial, (B) radial e (C) axial.....	157

Figura 8.8: Perfil de viscosidade do gás para o modelo LES.	158
Figura 8.9: Perfil de viscosidade do sólido para o modelo LES.	158
Figura 8.10: Mapeamento do campo de pressão.	159
Figura 8.11: Perfil de distribuição de velocidade tangencial do gás usando o modelo DES.	161
Figura 8.12: Mapeamento do campo de velocidade do gás: (A) velocidade axial; (B) velocidade tangencial e (C) velocidade radial.	162
Figura 8.13: Comparação entre os perfis de distribuição de velocidade tangencial do gás usando os modelos RSM, LES e DES.	163
Figura 8.14: Mapeamento do campo de velocidade tangencial do gás usando os modelos: (A) RSM e (B) LES para o diâmetro do finder de 50,8 mm.	164
Figura 8.15: Perfil de pressão para o modelo DES, tomado na posição $z = -0.12$ m.	165
Figura 8.16: Mapeamento do campo de distribuição da fração volumétrica dos sólidos.	166
Figura 8.17: Perfis comparativos para a velocidade tangencial do gás em presença de sólidos. Análise do escoamento monofásico e bifásico (30° e 45°).	169
Figura 8.18: Mapeamento do campo de velocidade do gás -(A) tangencial, (B) axial.	170
Figura 8.19: Mapeamento do campo de distribuição da fração volumétrica dos sólidos: (A) inclinação de 30° e (B) inclinação de 45°	170
Figura 8.20: Perfil de velocidade tangencial do gás em presença de sólido, para o ciclone com diâmetros: $D = 25.4$ mm e $D = 50.8$ mm, para o caso Patterson e Munz, 1996.	173
Figura 8.21: Mapeamento do campo de velocidade tangencial do gás em presença de sólido, para os casos: (A) $D = 25.4$ mm e (B) $D = 50.8$ mm.	174
Figura 8.22: Mapeamento do campo de pressão para os casos: (A) $D = 25,4$ mm e (B) $D = 50,8$ mm.	174
Figura 8.23: Trajetória das partículas: (A) ciclone com entrada inclinada; (B) caso com diâmetro do finder de $D = 25,4$ mm.	177
Figura 9.1: Malhas 3-D dos ciclones estudados: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60°	184
Figura 9.2: Distribuição da velocidade tangencial nos ciclones industriais estudados.	182
Figura 9.3: Mapeamento do campo de velocidade tangencial: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60°	183
Figura 9.4: Mapeamento do campo de pressão: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60°	184
Figura 9.5: Distribuição da velocidade tangencial para os escoamentos do gás (1F) e gás-sólido (2F).	186

Figura 9.6: Distribuição da velocidade tangencial o caso de inclinação de 30° .	186
Figura 9.7: Distribuição da velocidade tangencial o caso de inclinação de 45° .	187
Figura 9.8: Distribuição da velocidade tangencial o caso de inclinação de 60° .	187
Figura 9.9: Distribuição da velocidade tangencial para todos os casos estudados.	188
Figura 9.10: Mapeamento do campo de velocidade tangencial no escoamento bifásico: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30°, (C) 45° e (D) 60° .	189
Figura 9.11: Mapeamento do campo de velocidade axial no escoamento bifásico: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30°, (C) 45° e (D) 60° .	190
Figura 9.12: Mapeamento do campo de Pressão no escoamento bifásico: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30°, (C) 45° e (D) 60° .	191
Figura 9.13: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada normal.	195
Figura 9.14: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada inclinada em 30° .	195
Figura 9.15: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada inclinada em 45° .	196
Figura 9.16: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada inclinada em 60° .	196
Figura 9.17: Comparação entre as trajetórias das partículas para os vários casos estudados.	197
Figura 9.18: Avaliação da trajetória da partícula e do perfil vetorial de velocidade radial do sólido para os ciclones: (A) entrada normal.; (B) inclinação de 30°; (C) inclinação de 45°; (D) inclinação de 60° .	198

INDICE DE TABELAS

Tabela 1.1: Dimensões relativas das famílias de ciclones. A referência é o diâmetro (D) do ciclone.	6
Tabela 1.2: Efeito dos principais parâmetros que atuam sobre a queda de pressão em ciclones (Fonte: Fassani, 1997).	10
Tabela 3.1: Características dos estudos de caso para o escoamento monofásico.	37
Tabela 3.2: Características do estudo de caso para o escoamento bifásico: Caso 04 –Yuu et al. (1978).	39
Tabela 3.3: Características do estudo de caso para o escoamento bifásico: Caso 05- Patterson e Munz (1989).	40
Tabela 4.1: Propriedades Físicas e de Transporte das Fases.	48
Tabela 6.1: Relação entre refinamento da malha e esforço computacional para as simulações em estudo.	88
Tabela 7.1: Características do Estudo de Caso 04 para o Escoamento Bifásico.	127
Tabela 7.2: Características do Estudo de Caso 05 para o Escoamento Bifásico.	141
Tabela 7.3: Dados de Performance do ciclone no caso 05. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.	1146
Tabela 8.1: Dados referentes à queda de pressão para os experimentos numéricos envolvendo o ciclone inclinado.	154
Tabela 8.2: Dados referentes à eficiência de coleta para os experimentos numéricos envolvendo o ciclone inclinado.	155
Tabela 8.3: Resultados de Queda de Pressão e Eficiência de Coleta para o estudo da Influência da Inclinação da Entrada do Ciclone do caso Patterson and Munz(1989).	167
Tabela 8.4: Dados de Performance dos ciclones estudados. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.	171
Tabela 9.1: Dimensões do ciclone industrial em estudo (fonte: Peres (2002)).	180
Tabela 9.2: Condições Operacionais dos casos em estudo. (Fonte: Peres (2002)).	185
Tabela 9.3: Resultados numéricos de Queda de Pressão e Eficiência de Coleta.	192

RESUMO

Este trabalho é fruto do esforço iniciado por pesquisadores do Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos (FEQ-UNICAMP) visando estudar o escoamento do gás em ciclones. A premissa foi buscar a consolidação das informações já obtidas, usando como ferramenta para tal finalidade as modernas técnicas da Fluidodinâmica Computacional (CFD). O trabalho foi dividido em duas frentes: análise do escoamento monofásico (gás) e do escoamento bifásico (gás-sólido), tendo como foco o mapeamento do campo de velocidade, pressão e eficiência por meio de um modelo CFD tridimensional. O estudo foi embasado em resultados experimentais disponíveis na literatura científica, como também em experimentos numéricos desenvolvidos previamente por outros pesquisadores deste grupo de pesquisa. A busca incessante por informações que ajudem a elucidar o entendimento do complexo sistema de escoamento que ocorre no interior de um ciclone foi o marco inicial dos trabalhos do grupo. E neste trabalho apresenta-se a confirmação de informações anteriormente levantadas, como também novas perspectivas para a melhor compreensão do mecanismo de operação de um ciclone. As malhas numéricas tridimensionais foram geradas utilizando os pré-processadores Gambit e ICEM CFD HEXA e a partir daí os trabalhos foram desenvolvidos através de experimentos numéricos usando os pacotes computacionais em CFD: FLUENT (versão 6.0) e CFX (versões 5.5.1, 5.6 e 5.7) que fazem uso do método dos volumes finitos com variáveis localizadas (na qual todas as variáveis usam o mesmo volume de controle para realizar todas as integrações) na solução do sistema de equações de transporte, através de coordenadas generalizadas. Para adentrar no complexo campo da turbulência do escoamento, modelos de turbulência tais como RSM, LES e DES foram testados em simulações que foram capazes de extrair informações significativas a respeito do comportamento do escoamento do gás quando da presença de partículas sólidas. O trabalho abriu, ainda, uma ramificação para avaliar a influência de alterações na geometria do ciclone na fluidodinâmica de seu escoamento. Os resultados mostraram que a metodologia de trabalho empregada é adequada quanto à reprodução do comportamento fluidodinâmico dos escoamentos monofásico e bifásico em ciclones e que alterações geométricas propostas apontam para melhores resultados no processo de separação gás-sólido no equipamento.

ABSTRACT

This work is the result of the efforts of the CFD research group of the Chemical Processes Modeling and Simulation Laboratory located at FEQ-UNICAMP to study gas and gas-particle flow in a cyclone. The starting point was to consolidate previous information in cyclone flow using current CFD techniques. Two research lines were applied: the first one has studied gas flow and the second one was involved in the gas-solid flow study. These analyses were focused on fluid dynamics parameters like tangential, axial and radial velocities profiles, pressure and collection efficiencies using a three-dimensional CFD model. Experimental and numerical results available in the literature were used to validate simulation data obtained in this work. Three-dimensional numerical grids were constructed using pre-processors like GAMBIT and ICEM CFD HEXA. The numerical simulations were performed using the commercial CFD codes FLUENT (v6.0) and CFX (v5.5.1, 5.6 and 5.7). These softwares make use of finite volume method to solve transport equation system, using generalized coordinates. Turbulence models, like RSM, LES and DES were tested on simulations to extract important information about gas-solid flow profile. In addition, the influence of geometrical modifications on cyclone fluid dynamics was studied. The results showed that the methodology applied in this work is consistent to reproduce the fluid dynamic behavior of gas and gas-solid flow in a cyclone. Numerical results obtained here are in agreement with experimental results and other numerical data available in the literature. The modifications in the geometry proposed here indicate improvements in gas-solid collection efficiencies in the equipment. We believe that this study will contribute to increase the knowledge on cyclone fluid dynamics.

NOMENCLATURA

Letras Latinas

- A – área superficial (L)
a - altura do bocal de entrada do ciclone, (L);
b - largura do duto de entrada do ciclone, (L);
B - diâmetro da base do ciclone, (L);
 C_D – coeficiente de arraste (ML^3T^{-1}),
D – diâmetro da parte cilíndrica do ciclone, (L);
 D_e - diâmetro do tubo de saída de gás, (L);
G- geração de turbulência;
g- aceleração da gravidade, (L/T^2);
h- altura da seção cônica do ciclone, (L);
H- altura do ciclone, (L);
k- energia cinética turbulenta, (L^2/T^2);
 L_b - altura do coletor de sólidos, (L);
 m^* - fluxo mássico de sólidos ($M.T^{-1}$);
P – pressão do sistema ($ML^{-1}S^{-2}$);
 q_p – razão de alimentação ($M.L^{-3}$);
 Q_p – vazão volumétrica de gás (L^3T^{-1});
r- posição radial (L);
R –raio do ciclone (L);
 Re_{Dh} - número de Reynolds referenciado ao diâmetro hidráulico;
 S_ϕ – termo fonte;
S- altura do tubo de saída do gás, (L);
t- tempo, (T);
 \mathbf{u} - vetor velocidade, (L/T);
V –volume de controle, (L^3);
z – altura do topo do ciclone (L^3);

Letras Gregas

B – coeficiente de arraste gás-partícula (adimensional)

δ - tensor identidade, (M/LT²);

ε - fração volumétrica (adimensional);

ε - taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, (L²/T²);

κ - viscosidade bulk, (M/LT);

μ - viscosidade dinâmica (M/LT);

ρ - massa específica, (M/L³);

σ - constante do modelo k- ε ;

τ - tensor viscosidade, (M/LT²).

Abreviações

CFD – “Computational Fluid Dynamics” ou Fluidodinâmica Computacional;

CFX – código CFD comercial;

DES – Deatched Eddy Simulation;

DPQ - Departamento de Processos Químicos;

FEQ - Faculdade de Engenharia Química;

FLUENT - código CFD comercial;

LDA - “Laser Doppler Anemometer”;

LDV - “Laser Doppler Velocimetry”;

LES - “Large Eddy Simulation”;

LMSPQ - Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos;

RSM - “Reynolds Stress Model”

SIMPLEC – algoritmo de acoplamento pressão-velocidade

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

UPWIND – esquema de interpolação;

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO AO ESTUDO DOS CICLONES

“- Podes dizer-me, por favor, que caminho devo seguir para sair daqui?”

- Isso depende muito de para onde queres ir - respondeu o gato.

- Preocupa-me pouco aonde ir - disse Alice.

- Nesse caso, pouco importa o caminho que sigas - replicou o gato.”

(Lewis Carroll - Alice no País das Maravilhas)

1.1- Apresentação

Neste capítulo é discutido um conhecimento básico acerca de ciclones, incluindo os aspectos fenomenológicos, as características geométricas, os métodos empíricos e semi-empíricos para a predição da queda de pressão e da eficiência de coleta.

1.2- Introdução

O ciclone é um equipamento extensivamente usado na remoção de particulados presentes em correntes gasosas oriundas de diversos processos industriais. Sua ampla aceitação é decorrente de fatores como simplicidade de construção, baixo custo de operação, estrutura compacta, ausência de partes móveis e por requerer pouca manutenção. A principal desvantagem é a alta queda de pressão e, conseqüentemente, a energia requerida, quando comparado com outros equipamentos que desempenham a mesma função (Boysan *et al.*, 1982).

O modelo de ciclone, em sua forma mais usual, tem sido utilizado, sem que sofresse modificações, por mais de um século. Em geral, os modelos de ciclones reúnem-se em dois grupos: o ciclone de fluxo contínuo, e o convencional, mais comum, também conhecido

como ciclone de escoamento reverso. Neste último caso, a corrente gasosa circula espiralmente em sentido descendente a partir de uma entrada tangencial, em direção ao vértice de uma seção cônica na qual as partículas são depositadas e, a partir deste ponto, a direção do fluxo é revertida. Então, o escoamento torna-se ascendente, através de um vórtex, rumo ao tubo de saída axial do gás.

Uma considerável quantidade de dados experimentais sobre a performance de ciclones é encontrada na literatura, em sua maioria obtidas nos anos de 1930 e 1940. A coleta destes dados era feita usando-se medidores do tipo tubos de impacto, antes da disponibilidade de anemômetros do tipo Laser-Doppler ou sondas eletrônicas do tipo “hotwire”. Devido à sensibilidade de fluxos altamente turbulentos a perturbações aerodinâmicas, causadas por tais medidores, a confiança em tais dados não pode ser assegurada. Todavia, estes dados têm sido a base de muitas correlações necessariamente empíricas, nas quais diversos projetos de ciclones industriais são inteiramente baseados. O projeto destes equipamentos geralmente segue algumas correlações para obter a queda de pressão e a curva de eficiência de separação gás-sólido, como uma função de fatores geométricos e condições operacionais. Muitas destas correlações foram estudadas por Leith e Licht (1972), que selecionaram aquelas de maior acurácia para a confecção de projetos cujo método pudesse ser recomendado, e concluíram que um número de projetos otimizados pode ser obtido para uma aplicação específica. Destas alternativas, uma deve ser escolhida considerando-se também aspectos econômicos.

Em vista desta falta de um método de projeto rigoroso, é amplamente aceito que separadores mecânicos, tais como os ciclones, são capazes de atingir maiores performances do que aquelas obtidas atualmente. Esta afirmação é reforçada por citações em publicações, tais como: “... Começaríamos um estudo fundamental da mecânica dos fluidos do escoamento em ciclones para desenvolver um conhecimento da estrutura da turbulência e como impede atualmente a obtenção de elevadas eficiências neste equipamento” (Razgaitis *et al.*, 1977, in Dibb, 1997).

Há urgência em se obter melhores projetos de ciclones, tanto quanto a tendência em métodos de obtenção de formas alternativas de energia elétrica (particularmente a partir do carvão) geralmente referidas como “Tecnologia de Energia Avançada”. E estas novas tecnologias requerem o tratamento de gases para a remoção de particulados, por razões de controle de poluição, na busca por tecnologias mais limpas. O ciclone é um equipamento apropriado para este tipo de trabalho.

A ausência de conhecimento científico em pontos referentes ao processo de separação, que levariam ao esperado aumento da performance, é devida ao fato que, apesar de sua aparente simplicidade, a dinâmica dos fluidos nos ciclones é complexa, incluindo características como alta preservação da vorticidade e zonas de reversão de fluxo, entre outras.

O problema associado com a modelagem matemática de escoamentos envolve a solução de conjuntos de equações diferenciais parciais não-lineares que governam a conservação de massa e quantidade de movimento, e encontra-se muito além de qualquer aproximação capaz de fornecer soluções analíticas. Além disto, verificou-se na literatura que modelos de turbulência baseados na idealização de isotropia (modelo $k-\epsilon$, por exemplo) não são aplicáveis em casos de escoamentos altamente turbulentos (Meier (1998), Peres *et al.*(2002)). Nesta direção, modelos matemáticos, com capacidade para predizer corretamente os valores locais de variáveis hidrodinâmicas em geometrias bidimensionais e tridimensionais, estão se tornando cada vez mais alvo de pesquisas, e muitos trabalhos têm sido feitos na tentativa de modelar o fenômeno da turbulência. A natureza fundamental das leis da física que regem tais modelos engloba a generalidade de aplicação que é requerida em rigorosos métodos de projetos. Estas predições podem, então, ser mais exploradas para além do limite de medições experimentais, fato que fica prejudicado quando se trabalha com correlações derivadas de um conjunto de dados restritos a determinadas condições experimentais (Pericleous, 1987).

O campo de aplicações dos ciclones, incluindo sua diversidade e seus dados de escala, tem sofrido relevantes avanços desde o início dos anos de 1960. Tanto que atualmente estão presentes em ramos industriais como alimentos, óleo, cimento, nuclear e metalúrgica. Com esta diversificação, limitações no projeto e métodos de predição tornaram-se visíveis, e como um resultado, houve um aumento na realização de pesquisas nesta área (Pericleous, 1987).

Com o advento destas novas aplicações e a necessidade de uma melhor eficiência do equipamento nas modernas plantas de processos que o utilizam, os ciclones têm sofrido uma transformação, passando de um equipamento de baixa tecnologia para um de média ou alta tecnologia. Novos avanços em modelagem computacional têm permitido simular o complexo escoamento multifásico dentro do ciclone sem recorrer ao empirismo. Evidências experimentais ainda continuam sendo necessárias para validação de tais modelos, embora

atualmente a ênfase não seja apenas nos parâmetros gerais de performance, mas também nos detalhes do escoamento interno (Pericleous, 1987).

1.3- Descrição do Equipamento

Ciclones ou separadores ciclônicos são equipamentos utilizados para separar partículas sólidas em escoamentos de suspensões fluido-partículas. São equipamentos simples, de baixo custo em relação aos demais equipamentos industriais e de fácil construção e operação.

Quando o fluido utilizado é um gás, o equipamento é chamado de ciclone a gás, ou apenas ciclone, e quando o fluido é um líquido é chamado hidrociclone.

O ciclone também tem sido utilizado como reator químico e como trocador de calor (Szekely, 1966). Seu uso tem sido estendido além da convencional utilização como coletor e separador de partículas, incluindo a secagem de materiais granulares, combustão de óleo (Seidl *et al.*, 1955 in Szekely, 1966), e redução de minério de ferro (Nogiwa, 1961 in Szekely, 1966), e ainda, como equipamentos de troca térmica, com a função de pré-aquecedor na indústria de cimento (Ludera, 1989), gaseificador (Gabra *et al.*, 2001) e como secador (Heinze (1984), Nebra (1985), Silva (1991), Benta (1997), Nebra *et al.* (2000), Corrêa *et al.* (2000)).

Referências bibliográficas atestam o emprego de ciclones desde o século XIX. Atualmente, seu uso é amplamente difundido em indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas, de cimento e mineração, por exemplo. Em refinarias de petróleo, onde o processo de craqueamento catalítico é utilizado, os ciclones são equipamentos importantes para assegurar a continuidade operacional, retendo o catalisador no processo e impedindo sua emissão para a atmosfera, evitando a perda do material e o efeito poluente. Os principais motivos do sucesso de sua ampla aplicabilidade são a sua simplicidade de construção e manutenção, sua alta eficiência de coleta para partículas com diâmetro superior a 5 μm e, também, a possibilidade de aplicações em condições severas de temperatura e de pressão (Meier, 1998). Em contrapartida à simplicidade dos ciclones está o seu comportamento fluidodinâmico, que apresenta fenômenos de alta preservação de vórtice, zonas de reversão do escoamento, regiões de recirculação, contato gás-sólido, alta intensidade de turbulência entre outros (Meier, 1998).

Seu mecanismo básico consiste em uma corrente gasosa carregada de partículas, que entra pela parte superior da seção cilíndrica, tangencialmente, onde se inicia o movimento de vórtice. O esquema de um ciclone típico é apresentado na Figura 1.1. Ele é constituído por uma seção cilíndrica de diâmetro D , uma entrada, usualmente tangencial, através da qual a suspensão gás-sólido entra no ciclone, uma seção cônica que liga o corpo cilíndrico ao coletor de sólidos e um tubo para descarga do gás limpo, conhecido como “vórtex finder”, localizado na região superior do equipamento (Stairmand, 1951; Lapple, 1951).

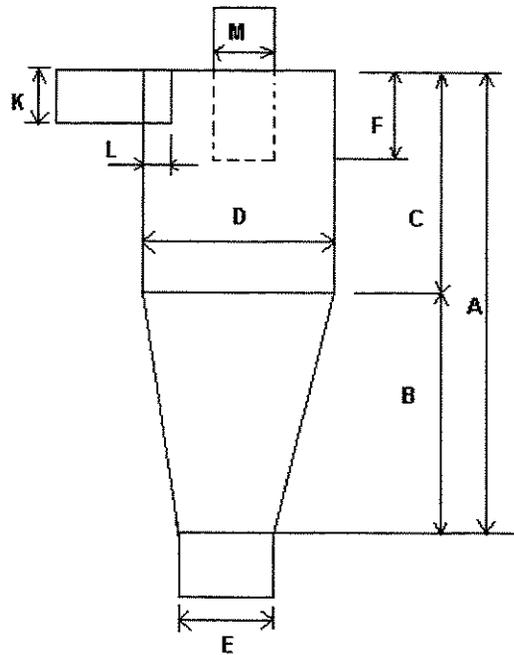


Figura 1.1: Representação esquemática de um ciclone.

As dimensões principais apresentadas na figura são:

- A - Altura total do ciclone;
- B – Altura da parte cônica;
- C – Altura da parte Cilíndrica;
- D – Diâmetro da parte cilíndrica;
- E – Diâmetro da base do cone;
- F – Comprimento do tubo de saída;
- K – Altura da seção de entrada;
- L – Largura da seção de entrada;
- M – Diâmetro do tubo de saída;

Modelos ou famílias de ciclones são estabelecidos quando um conjunto de dimensões é fixado em relação ao diâmetro principal. Existem vários modelos de ciclones na literatura, sendo os mais citados os de Stairmand (1951) e de Lapple (1951). A Tabela 1.1 a seguir apresenta as características geométricas destes ciclones, fornecidas em relação ao diâmetro principal.

Tabela 1.1: Dimensões relativas das famílias de ciclones. A referência é o diâmetro (D) do ciclone.

Tipo de Ciclone	DIMENSÃO							
	A	B	C	E	F	K	L	M
Stairmand*	4,000	2,500	1,500	0,375	0,500	0,500	0,200	0,500
Stairmand**	4,000	2,500	0,575	0,875	0,375	0,750	0,375	0,750
Lapple	4,000	2,500	2,000	0,250	0,625	0,500	0,250	0,500

* Ciclones de alto rendimento.

** Ciclone de alta vazão.

Esses ciclones foram desenvolvidos através de experimentos, visando otimizar o desempenho, isto é, obter alta eficiência de coleta, baixa perda de pressão e alta vazão. No entanto, segundo Dirgo and Leith (1985), não existe fundamentação teórica que garanta a superioridade de um dado modelo para atender a estas características. A vantagem de se utilizar estes ciclones, cujos modelos são tradicionais, está no fato de seu desempenho ser conhecido através de seu estudo por vários autores.

1.3.1- Características do Escoamento

O escoamento no interior de um ciclone típico, incluindo suas características fenomenológicas, pode ser observado na Figura 1.2 a seguir, sugerida por Ogawa (1997).

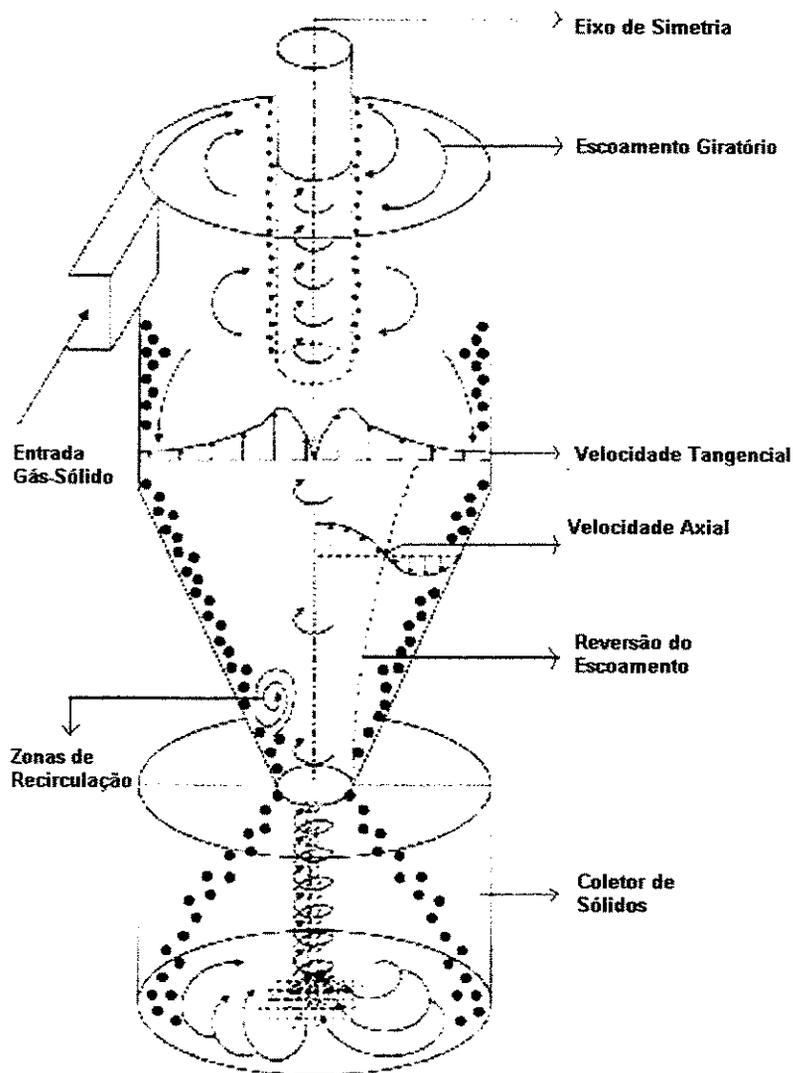


Figura 1.2: Ciclone e suas características fenomenológicas (Fonte: Ogawa, 1997).

Descrição do escoamento:

A suspensão gás-sólido entra no ciclone por uma entrada tangencial e inicia um escoamento giratório na seção anular compreendida entre o tubo de saída do gás e o corpo do ciclone (Meier, 1998). O movimento das partículas sólidas pode ser avaliado com relação ao efeito das forças atuantes sobre as mesmas por estarem centradas na corrente de gás. Segundo Corrêa (2003), a trajetória das partículas sólidas é determinada pelo balanço de forças resultantes entre a força peso (atuando sobre a partícula) e a força de arraste (do

movimento do gás), além de sua própria inércia, ou seja, devido ao impulso que a partícula já possui em função de sua massa e velocidade de entrada. Assim, as partículas sólidas se movimentam em direção às paredes do ciclone devido à sua própria inércia. As partículas menores atingem a parede interna do tubo de saída e, praticamente, deslizam coladas à parede. O mesmo movimento é observado nas partículas adjacentes à parede externa (Meier, 1998). O gás, por sua vez, inicia um escoamento giratório com alta velocidade, promovendo um significativo incremento na intensidade de turbulência. Este incremento de turbulência promove uma dispersão de quantidade de movimento que, associado às parcelas convectivas e suas resultantes, como força centrífuga e de Coreolis, conduzem ao movimento giratório com reversão de fluxo e preservação de vorticidade (Meier, 1998). Devido a efeitos de geometria e aqueles decorrentes desse complexo comportamento fluidodinâmico, o gás apresenta ainda regiões de recirculação, que elevam o tempo de residência das partículas e provocam erosão na estrutura metálica dos ciclones, devido à frequência dos choques com a parede (Meier, 1998).

O estudo experimental de perfis de velocidade e pressão num ciclone usado como separador de partículas apresentou as seguintes conclusões (Ter Linden (1949) apud Dibb (1997)):

- i) Exceto na área turbulenta, no centro do ciclone, a velocidade do gás varia diretamente com a componente tangencial, que aumenta à medida que a distância ao centro do ciclone diminui (a componente tangencial apresenta um máximo e depois cai, em direção ao centro);
- ii) Na parte cônica do ciclone, a velocidade tangencial aumenta consideravelmente conforme a parte cônica se torna mais estreita;
- iii) Para uma mesma distância do eixo central do ciclone, a velocidade tangencial é maior na parte cônica do que na parte cilíndrica.

Patterson e Munz (1996) descreveram três regiões distintas que se formam durante o escoamento do gás no interior do ciclone, as quais encontram-se descritas na vista superior representada na Figura 1.3 a seguir.

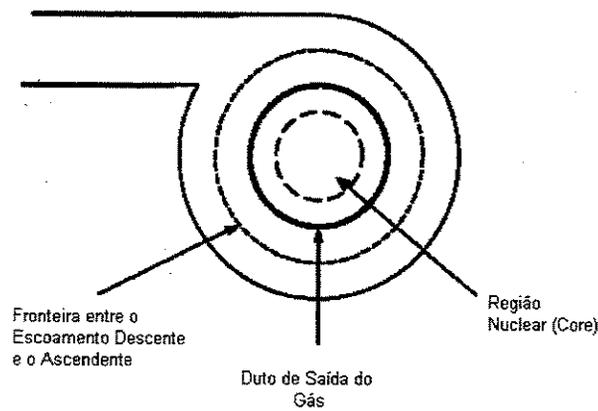


Figura 1.3: Regiões características no escoamento em um ciclone (Fonte: Patterson e Munz, 1996).

Estas três regiões são descritas como segue:

Uma região externa, espiralada e descendente próxima à parede (região 1);

Uma região anelar interna, cujo escoamento é bastante giratório (região 2);

Um núcleo mais interno, onde o escoamento é principalmente ascendente axialmente, com movimentos espiralados (região 3).

A localização destas regiões depende do fator definido pela relação entre o raio interno (r) e o raio da parte cilíndrica do ciclone (R). Tem-se $r/R \equiv 0$ para o eixo de simetria e $r/R = 1$ na parede do ciclone. A transição entre as regiões 1 e 2 ocorre numa região para a qual a razão $r/R \equiv 0,6$ do raio do ciclone, enquanto que a transição entre as regiões 2 e 3 ocorre aproximadamente a $r/R \equiv 0,35$ do raio do ciclone (Patterson e Munz, 1996).

1.3.2- Desempenho dos Ciclones

As principais características do desempenho dos ciclones são sua eficiência de coleta e sua queda de pressão. O eficiência é definido como a razão entre a massa de sólidos coletada e a massa de sólidos introduzida no ciclone. A queda de pressão é a diferença entre as pressões estáticas da entrada e da saída dos ciclones (Fassani, 1997).

A eficiência de coleta e a queda de pressão são influenciados por vários fatores, como a geometria do ciclone, as propriedades físicas do gás e das partículas, a velocidade

do escoamento e a concentração de sólidos na entrada do ciclone (Hoffman *et al.* (1991) apud Dibb (1997)).

O desempenho dos ciclones usualmente é melhor conhecido para condições de baixa concentração de sólidos mas, em algumas aplicações, a concentração pode ser bastante elevada. O conhecimento dos efeitos da concentração sobre a eficiência de coleta e a queda de pressão é necessário para o projeto e a operação adequados deste equipamento. No presente estudo, faz-se a abordagem do desempenho dos ciclones em termos da queda de pressão e da eficiência de coleta.

1.3.2.1- Queda de Pressão:

A queda de pressão em ciclones é função de variáveis como a vazão dos gases e a geometria do equipamento (área da seção transversal do tubo de saída de gases, por exemplo). A Tabela 1.2 (Fassani, 1997) a seguir apresenta um panorama do efeito das principais variáveis sobre a queda de pressão entre a entrada e a saída do ciclone.

Tabela 1.2: Efeito dos principais parâmetros que atuam sobre a queda de pressão em ciclones (Fonte: Fassani, 1997).

FATOR	EFEITO
Aumento da velocidade de entrada	Aumento da queda de pressão proporcional ao quadrado da velocidade de entrada
Aumento da altura da entrada, K	Aumento da queda de pressão
Aumento da largura da entrada, L	Aumento da queda de pressão
Aumento do diâmetro do tubo de saída, M	Diminuição da queda de pressão proporcional ao quadrado do diâmetro do tubo de saída
Variação do comprimento do tubo de saída no interior do ciclone	Pouca influência sobre a queda de pressão
Variação no diâmetro do ciclone	Pouca influência sobre a queda de pressão

A queda de pressão do ciclone operando sem partículas usualmente é expressa pela equação:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V^2}{2} \quad (1.1)$$

Onde ρ é a massa específica do gás, V é a velocidade do gás na entrada do ciclone e ξ é um fator constante para cada modelo de ciclone. Na literatura, existem muitas expressões para determinar ξ a partir da geometria do equipamento. Apesar da complexidade de algumas expressões, nenhuma delas é capaz de fornecer uma estimativa confiável da perda de pressão para todos os tipos de ciclone operando em condições variadas (Leith (1984) apud Fassani (1997)). Uma das primeiras expressões para avaliar ξ foi desenvolvida por Shepherd e Lapple (1940), dada por:

$$\xi = 16 \frac{KL}{M^2} \quad (1.2)$$

Que fornece ΔP em N/m^2 , com K , L e M correspondentes às dimensões do ciclone, especificadas na Figura 1.1. Embora a equação 1.2 não inclua todas as dimensões do ciclone, ela fornece estimativas da queda de pressão tão boas quanto as produzidas pelas demais correlações disponíveis (Leith (1984) apud Fassani (1997)).

Existem ainda, na literatura, modelos de previsão de eficiência de coleta em função do diâmetro das partículas que não consideram o efeito da concentração. Discussões sobre tais modelos foram detalhadas por Clift *et al.* (1991), e por Souza *et al.* (1995). Uma expressão desenvolvida por Leith e Licht (1972) e revisada por Clift *et al.* (1991), representativa desse tipo de modelo, é dada por:

$$\eta = 1 - \text{Exp} \left[\frac{-\rho_p}{9\mu} \left(\frac{dV}{D/2} \right)^2 \left(\frac{\text{Vol}}{Q} \right) \right] \quad (1.3)$$

onde ρ_p é a densidade das partículas, μ é a viscosidade do gás, D é o diâmetro do ciclone, Q é a vazão de gás, V é a velocidade do gás na entrada do ciclone, Vol é o volume do ciclone e d é o diâmetro da partícula.

Na literatura encontram-se publicações acerca da influência da fase particulada, presente no fluxo gasoso, e a queda de pressão. O estado da arte neste assunto pode ser iniciado pelos trabalhos de Sheperd e Lapple (1939), os quais foram pioneiros em trabalhos abordando o efeito da concentração de sólidos sobre a queda de pressão num ciclone, observando que o aumento da concentração de sólidos leva a uma diminuição da queda de pressão. Este fato foi atribuído à inércia das partículas que, ao caírem em movimento perpendicular ao escoamento de gás, tenderiam a equalizar a quantidade de movimento do gás em camadas adjacentes. Reforçando as observações anteriores, Yuu *et al.* (1978) observaram que a presença de partículas na corrente gasosa reduz a perda de pressão em até 30%, mesmo em concentrações extremamente baixas de sólidos. No mesmo ano, Littlejohn *et al.* (1978) estudaram o efeito da influência da concentração de sólidos sobre a queda de pressão, à luz da variação da vazão de gás, analisando um escoamento sem partículas e escoamento com partículas. Se a vazão do gás for mantida constante, ao se iniciar a alimentação de sólidos, ocorrerá uma grande transferência de momento do gás para os sólidos (o arraste). Devido a este fato, a velocidade do gás se reduz e com isso a queda de pressão diminuirá. Este efeito é maior para maiores concentrações de sólidos. Segundo Yuu *et al.* (1978) as partículas depositadas na parede são a causa da redução da queda de pressão através do ciclone. Mais tarde, Beeckman *et al.* (1987) confirmaram as observações de Littlejohn *et al.* (1978), reafirmando que a queda de pressão continuou a existir mesmo após a interrupção da descarga de sólidos. Eles observaram que o ciclone é capaz de manter um teor de sólidos circulando em seu interior por significativos períodos de tempo após a interrupção da alimentação de sólidos. Isto acontece com concentrações baixas de sólidos. Mais recentemente, Tardin Jr *et al.* (1994) estudaram a influência da concentração de sólidos na entrada de um ciclone operando num leito fluidizado circulante. A queda de pressão confirmou-se como sendo proporcional à concentração de sólidos na fase particulada e que a perda de pressão foi maior para partículas com diâmetros médios maiores.

1.3.2.3 – Eficiência de Coleta

A eficiência de coleta de um ciclone depende de sua configuração geométrica, das propriedades físicas do gás e das partículas e das condições operacionais (Fassani, 1997).

Iniciando o estado da arte pelo trabalho de Zenz (1975), o pesquisador mostrou que o aumento da concentração de sólidos na entrada do ciclone, variando de $1,868.10^{-3}$ a

1,868 kg de sólidos/kg de gás, resultou num aumento da eficiência de coleta, sendo o efeito mais pronunciado para a coleta de partículas pequenas. Mais tarde, Tawari et al. (1984) reproduziram este trabalho, estabelecendo um procedimento para estimar a eficiência de coleta nessa faixa de concentrações a partir do conhecimento da eficiência em baixas concentrações. Hoffman *et al.* (1991) realizaram trabalhos experimentais avaliando a influência da velocidade do gás de entrada e da concentração de sólidos na queda de pressão em ciclones. Observaram que houve um aumento da eficiência de coleta com o aumento da concentração de sólidos na corrente de entrada e que o efeito da concentração sobre a eficiência de coleta varia com a velocidade do gás na entrada do ciclone, sendo mais pronunciado para velocidades menores.

Segundo Ogawa (1997), a queda de pressão ΔP_c (Pa) dos ciclones, a dissipação $W = \Delta P_c \times Q_0$ (W), e a eficiência de coleta η_c (%) de um dado ciclone são dependentes inicialmente da distribuição da velocidade tangencial, a qual é descrita como função do número de Reynolds do escoamento (Re_c), dado por: $Re_c = Q_0/H_i.v$.

Onde: Q_0 (m^3/s) é a vazão do escoamento do gás, H_i (m) é o comprimento da parte cilíndrica do equipamento e v (m^2/s) é a viscosidade cinemática do gás. Quando partículas sólidas finas devem ser coletadas pelo ciclone, o efeito centrífugo do ciclone deve ser aumentado. O efeito centrífugo depende diretamente da velocidade tangencial da partícula sólida (Ogawa, 1997) e, conseqüentemente, da velocidade tangencial do gás, a qual implica com o aumento da queda de pressão do ciclone.

1.4-Construção Geral do Ciclone

Um separador de particulados ciclônico (chamado aqui de ciclone) é aplicado em muitos campos industriais, por exemplo, tecnologia de força, câmaras de combustão, várias plantas químicas, etc. Até o momento, há diversos tipos para fins de separação de partículas sólidas. Entretanto, os seguintes tipos de ciclones são os mais comuns: escoamento reverso ou ciclone com escoamento do tipo reverso, ciclone com escoamento tipo axial e ciclone com escoamento rotatório com injeção de um segundo escoamento de gás ao corpo do ciclone.

1.4.1- Escoamento Reverso

O mais importante padrão de construção de escoamento do tipo reverso é mostrado na Figura 1.2 (Ogawa, 1997). As posições estabelecidas na entrada são divididas em três tipos conforme a Figura 1.4 a seguir.

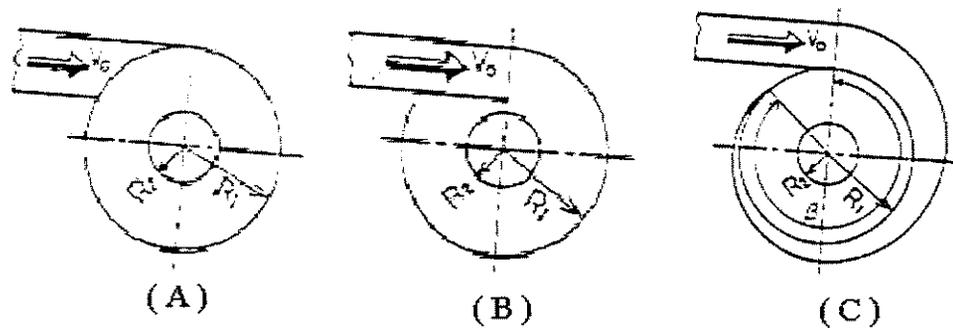


Figura 1.4: Três tipos de duto de entrada introduzindo o escoamento do gás, tangencialmente, ao ciclone (Fonte: Barth, 1956).

O tipo (A) é o tipo padrão e de fácil construção; Tipo (B) é o tipo de construção mais caro, no qual a entrada se estende em torno do tubo de saída e, ao mesmo tempo, descende gradualmente e conecta-se com o corpo do ciclone. O mérito deste tipo de entrada é que ela tem o efeito de gerar o escoamento da fase descontínua no sentido descendente; Tipo (C) é o mais conhecido de todos, também chamado de tipo Landen, o qual congrega o tubo de entrada a um ângulo β em torno do corpo do ciclone. Ter Linden (1949) investigou experimentalmente a eficiência de coleta como função do ângulo β , como mostrado na Figura 1.5 a seguir.

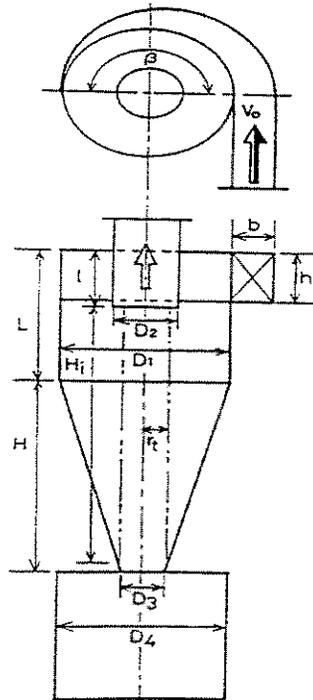


Figura 1.5: Ilustração esquemática do ciclone de Ter Linden e suas notações principais
(Fonte: Ter Linden, 1949).

Segundo este autor, o ângulo ótimo seria $\beta = 180^\circ$, e que o aumento neste valor não promoveria melhoras na eficiência de coleta, tornando ainda o custo de construção do equipamento, desnecessariamente, elevado.

Em geral, as razões entre as dimensões de um ciclone são como segue: (onde D_1 é o diâmetro do corpo do ciclone, D_2 é o diâmetro do tubo de saída do gás, D_3 é o diâmetro interno do tubo de saída das partículas, L é comprimento do ciclone, H é o comprimento da parte cônica): $D_1 = (2,0\sim 3,0)D_2$, $L = D_1$, $H = (1,2\sim 1,5)D_1$, $D_3 = D_2$, e $\beta = 180^\circ$. O diâmetro de corte de um ciclone representa o tamanho das partículas que podem ser coletadas numa taxa de 50% das partículas alimentadas na entrada do ciclone. Dependendo da razão D_1/D_2 e da dimensão de D_2 , 50% podem não ser coletadas e escapar do ciclone. Quando o diâmetro de corte (X_c) for muito pequeno, o diâmetro D_2 do tubo de saída do gás deve ser menor. Então, Q_0 para cada ciclone torna-se um valor baixo. Conseqüentemente, quando o escoamento total do gás aumenta, o equipamento de coleta torna-se um sistema de multiciclones (Schmidt (1990) apud Ogawa (1997)).

1.4.2-Escoamento Axial

Um ciclone com escoamento axial tem a mais simples forma de construção. É composto do gerador de vórtice com hélices guiadas para gerar o escoamento gasoso rotacional na câmara de vórtice, um duto de drenagem para exaurir o gás com as partículas sólidas coletadas, e de um duto de saída para eliminar o gás limpo. (Daniels (1957) apud Ogawa (1997)).

Há três diferenças principais entre o tipo de escoamento reverso com entrada tangencial e o tipo de escoamento axial com hélices guiadas fixas. A primeira é que a velocidade tangencial do escoamento giratório no tipo de escoamento reverso é mais rápida do que no tipo de escoamento axial. A segunda diferença é que o tempo de residência do escoamento do gás no tipo de escoamento reverso é maior do que aquele para o tipo de escoamento axial. Isto significa que é possível coletar as partículas sólidas mais finas, que correspondem à velocidade de sedimentação mais baixa no tipo de escoamento reverso. A terceira diferença é que uma geração desnecessária de turbulência é promovida pela corrente gerada nas hélices fixas no tipo de escoamento axial. Esta turbulência não apenas reduz a velocidade tangencial do gás como também aumenta a difusão turbulenta das partículas sólidas finas, levando à redução da eficiência de coleta do tipo de escoamento axial (Alekseev *et al.* (1980) apud Ogawa, 1997).

CAPÍTULO 02

REVISAO BIBLIOGRÁFICA

“- Viste como ergueram aquele edifício de grandeza imponente?

- Um tijolo, e outro. Milhares. Mas um a um.

- E sacos de cimento, um a um. E blocos de pedra, que pouco representam na mole do conjunto.

- E pedaços de ferro. - E operários que trabalham, dia a dia, as mesmas horas.

- Viste como levantaram aquele edifício de grandeza imponente?...

À força de pequenas coisas!”

(Josemaría Escrivá)

2.1- Apresentação

O principal intuito deste capítulo é apresentar, de uma forma clara e objetiva, o material bibliográfico básico sobre a aplicação de técnicas da fluidodinâmica computacional (CFD) para a simulação de ciclones. Além da apresentação das principais características, discussões e conclusões obtidas com os modelos e métodos utilizados pelos pesquisadores consultados, procurar-se-á definir alguns pontos básicos que nortearão as características da metodologia a ser seguida nesta investigação científica.

O material a ser discutido a seguir não abrange, evidentemente, todos os trabalhos publicados em mais de um século de pesquisas na área de ciclones, mas representa uma amostragem significativa dos estudos de simulação de ciclones, incluindo técnicas de CFD, realizados no período de 1966 a 2004.

No que se refere às técnicas da Fluidodinâmica Computacional (CFD) aplicadas ao escoamento do gás em ciclones, poucos foram os trabalhos publicados na literatura científica no período compreendido entre 2002 e 2004. A resenha dos trabalhos consultados foi feita, então, dentro dos capítulos a que se referiam, ou seja, quando se estudava modelagem matemática, os trabalhos consultados foram alocados no capítulo 04, já quando

o assunto se referia à métodos numéricos, a resenha dos trabalhos foi alocada no capítulo 05. Convém aqui, então, apresentar a resenha dos trabalhos mais relevantes encontrados na literatura e cujas características inspiraram o trabalho desenvolvido nesta tese.

2.2- Resenha do Material Consultado

A literatura apresenta uma grande quantidade de material bibliográfico sobre ciclones realizado desde o início do século XX. Como o objetivo desta pesquisa restringiu-se à aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional para a simulação de ciclones, focalizaram-se as atenções nesta área.

Para se delinear o “Estado da Arte” na simulação de ciclones, a partir da utilização de técnicas de fluidodinâmica computacional, necessariamente tem que se iniciar com uma discussão do trabalho de **BOYSAN *et al.* (1982)**. Neste trabalho, os fundamentos foram baseados num procedimento capaz de prever não apenas os parâmetros gerais do projeto de ciclones, mas, adicionalmente, fornecer todos os detalhes do escoamento do gás e do caminho das partículas. Os resultados referentes ao campo de escoamento do gás foram discutidos e comparados com dados experimentais encontrados na literatura, então, o movimento da partícula é considerado e as eficiências de coleta calculadas foram comparadas com aquelas obtidas por Stairmand (1951) e por Mothes *et al.* (1981). Os autores utilizaram um modelo euleriano-lagrangeano para o desenvolvimento do trabalho. Este modelo usa o enfoque euleriano para descrição dos princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento para todas as fases e o modelo lagrangeano é usado para descrição da trajetória das partículas e dados sobre eficiência de coleta do ciclone. Porém, não levaram em consideração a influência da fase descontínua (particulada) sobre a fase contínua (gasosa). Além desta simplificação, outra questão imposta foi a consideração de que a geometria do sistema, através da simetria dos eixos, foi tratada como sendo bidimensional em coordenadas cilíndricas, sem que houvesse variação dos componentes de velocidade com a direção θ . A principal justificativa dos autores para o uso desta simetria foi a de que haveria uma redução bastante significativa no esforço computacional e que tal redução apresentaria maiores ganhos, quando comparados com a perda de precisão com a consideração bidimensional. Ainda nas considerações deste trabalho, os autores se

apresentaram como pioneiros do procedimento de desacoplamento das fases (contínua e particulada) para o escoamento em fase diluída. O modelo de turbulência usado consistiu numa combinação entre o modelo $k-\varepsilon$ padrão (Launder *et al.* (1974)) e os tensores algébricos de Rotta (1951) e Rodi (1976). Os métodos numéricos empregados corresponderam a uma versão do então novo método (a época) dos volumes finitos. Os autores conseguiram resultados que indicaram ser possível construir um modelo capaz de prever o complexo comportamento do escoamento do gás em ciclones, incluindo a reprodução, a níveis satisfatórios, da predição da queda de pressão, perfis de velocidade tangencial e axial e eficiência de coleta (ambos qualitativa e quantitativamente). Ainda, foi possível obter um modelo para o comportamento da fase particulada, sendo este usado para prever a eficiência de coleta de ciclones. Porém, alguns aspectos deste trabalho não ficaram bem esclarecidos, principalmente o que diz respeito à transformação do problema tridimensional (em razão da simetria de entrada do ciclone) para bidimensional. Contudo, vale ressaltar a importância científica deste trabalho, como precursor no estudo aprofundado do escoamento gás-sólido em ciclones, especialmente se levarmos em consideração os recursos computacionais bem inferiores disponíveis na época, tanto no que se refere aos computadores existentes quanto aos métodos de solução para os experimentos numéricos.

PERICLEOUS (1987) apresentou como proposta uma alternativa real, usando técnicas numéricas, para uma descrição física do escoamento no interior de ciclones da classe hidrociclones, e utilizou as equações de Navier-Stokes para descrever velocidades de mistura e as equações de transporte para o ar e a concentração de partículas. A turbulência foi modelada de modo que contivesse os efeitos de turbilhões e a presença de partículas. Os tensores de Reynolds foram modelados a partir de um modelo isotrópico baseado numa simplificação da teoria do comprimento de mistura de Prandtl. O modelo algébrico ASM (“Algebraic Slip Model”) foi usado para representar a migração relativa de partículas e ar na mistura líquida. A modelagem matemática descrita na pesquisa foi desenvolvida usando o método dos volumes finitos e um código computacional comercial de CFD para escoamento de fluido multidimensional, bifásico, denominado PHOENICS, a partir das considerações de que o escoamento era estacionário, bidimensional e axialmente simétrico. As equações foram resolvidas para continuidade, momento e concentração das espécies. Como resultado, foi apresentado um modelo matemático para hidrociclones, cujas

características incluem a análise do campo de escoamento e comportamento da partícula dentro do ciclone pela aplicação de técnicas numéricas, normalmente associadas a indústrias de alta tecnologia, a uma ciência totalmente empírica. O método de solução é geral e aplicável a qualquer tipo de hidrociclone e também a ciclones a ar. O modelo mostrou-se hábil para prever perfis de velocidade de mistura e a distribuição detalhada das partículas, além dos parâmetros usuais associados à performance, como queda de pressão, escoamento descendente e eficiência de separação. A principal contribuição deste trabalho foi estabelecer um método de predição seguro para hidrociclones. Entretanto, uma grande quantidade de trabalhos de validação é necessária antes que todas as limitações sejam reveladas e removidas. O valor do método, como uma ferramenta, aponta para o fato de que, uma vez que não é empírico ele pode ser aplicado com confiança a diferentes tipos de configurações de ciclones.

DUGGINS *et al.* (1987) apresentaram um trabalho que objetivou ampliar o conhecimento dos mecanismos do escoamento interno de ciclones, particularmente em relação à característica especial do fenômeno da turbulência, causado pela alta intensidade de giro do gás, observado em tais escoamentos. A evidência de partida residiu no fato de que os modelos de turbulência, até então existentes, em sua forma básica, eram inadequados para descrever tal fenômeno e havia a necessidade de modificações que tentassem descrevê-lo melhor. Os autores analisaram o fato de que havia uma grande diferença no perfil de velocidade quando se considerava o componente giratório de velocidade no escoamento do gás, em relação àqueles nos quais não se considerou o giro, atribuindo a este giro uma redução significativa da transferência líquida de energia no sentido dos turbilhões maiores para os menores. O efeito observado recaí sobre a taxa de dissipação de turbulência, causando a sua diminuição. Também leva a um aumento na escala de turbulência, especialmente próximo ao eixo de rotação. O modelo proposto objetivava partir do modelo $k-\epsilon$ padrão (isotrópico) e modificá-lo considerando a anisotropia dos tensores de Reynolds. Tal modificação baseava-se na inclusão de um modelo simplificado de comprimento de mistura para o componente $\mu_{r\theta}$ do tensor de Reynolds. A modificação no modelo de turbulência $k-\epsilon$ padrão utilizou duas viscosidades turbulentas, ambas variando em magnitude ao longo do campo de escoamento. A viscosidade para as equações de momento radial e axial foi calculada a partir de um modelo

k-ε padrão e a viscosidade para a equação de momento tangencial foi calculada a partir de uma expressão para o comprimento de mistura. Deste modo, foi feita a avaliação da anisotropia da turbulência que existe em escoamentos com altos níveis de giro. A principal conclusão deste trabalho foi que o modelo k-ε padrão não permite uma boa predição do pico de velocidade tangencial situado entre a parede interna do ciclone e o eixo de simetria do mesmo. E estas predições foram melhoradas com a modificação do modelo k-ε padrão pela utilização do comprimento de mistura. O inconveniente, mas inevitável, nesta modificação sugerida foi o fato de que o uso de expressões para o comprimento de mistura inclui o uso de uma constante empírica adicional. O procedimento para a solução do modelo proposto foi feito através de um código CFD denominado CHAMPION 2/E/FIX, apropriado para escoamentos bidimensionais. Os resultados numéricos mostraram sensíveis diferenças entre os resultados obtidos com o modelo k-ε padrão (isotrópico) e aqueles obtidos através da modificação proposta (anisotrópico).

ZHOU e SOO (1990), apresentaram um trabalho que avançou no estudo do comportamento do escoamento do ar no interior do ciclone, avaliando perfis de velocidade, queda de pressão, turbulência e eficiência de coleta. Medidas experimentais foram conduzidas utilizando o medidor “Laser Doppler Velocimeter” (LDV) e também se buscou avaliar a influência da presença de um corpo sólido inserido no eixo de simetria do ciclone, sobre os perfis de velocidade, queda de pressão e eficiência de coleta. Os parâmetros de geometria e operação do ciclone, usado como objeto de estudo, foram selecionados de forma a facilitar tanto as medidas com LDV quanto a modelagem numérica, fato que comprometeu a análise da eficiência de coleta. Os autores fizeram simplificações que comprometeram o caso real de escoamento ciclônico, a saber: (i) Negligenciaram o efeito das partículas no perfil de escoamento do gás; (ii) Desconsideraram os efeitos térmicos, (iii) Desconsideraram o efeito tridimensional causado pelo bocal de entrada do ciclone. As equações de conservação foram resolvidas através de um procedimento numérico por diferenças finitas, conhecido como algoritmo SIMPLE, através do método de iteração linha por linha denominado TDMA (“TriDiagonal Matrix Algorithm”). Os resultados indicaram que a simulação numérica baseada no modelo k-ε (apesar das dificuldades deste modelo para predição do escoamento vorticial), e as medidas de velocidade do gás e da partícula utilizando o medidor LDV num ciclone, apresentaram boa concordância quando

comparadas com os resultados analíticos. Tais resultados revelaram que as aproximações usadas na solução analítica foram válidas no delineamento das principais características do escoamento turbulento. A principal conclusão do trabalho aponta para a significativa influência da presença do dispositivo tipo agulha no interior do ciclone, sendo observada uma redução na queda de pressão equivalente a 1/3 do valor obtido sem a agulha. Ainda, houve o deslocamento do pico de velocidade tangencial em direção à parede do ciclone, do qual resultaria um incremento na eficiência do equipamento. Conforme salientado no início, foi proposto um modelo bidimensional, com uma aproximação da entrada tridimensional para bidimensional. Os autores destacaram a importância de se continuar as pesquisas em linhas tais como modelo de turbulência para a fase gasosa e predições, em simulação numérica, da influência da fase sólida no escoamento e o comportamento da mesma.

BASKAKOV *et al.* (1990) estudaram o fenômeno de transferência de calor em diferentes seções de um ciclone operando em duas situações: uma corrente de ar contendo particulados e outra corrente de ar sem a presença de particulados. A queda de pressão também foi avaliada. A investigação do efeito aerodinâmico, para a corrente de ar contendo particulados, foi feita com um modelo de ciclone transparente em acrílico, com as mesmas dimensões do ciclone real. Os resultados indicaram que o perfil de temperatura da corrente gasosa dentro do ciclone é influenciado pela presença de sólidos nesta corrente. Quando operando com gás puro, a temperatura do gás diminuía à medida que a corrente gasosa escoava no sentido descendente, devido à perda de calor pelas paredes do ciclone. Radialmente, houve a formação de um pico de temperatura, próximo ao eixo de simetria do ciclone. Por outro lado, quando há particulados na corrente gasosa, o perfil de temperatura mostrou que a mesma aumentava, com um nível constante em todas as seções radiais do ciclone, uma vez que a fase sólida move-se apenas em sentido descendente e, então, transfere uma grande quantidade de calor à parte cônica do ciclone. O estudo da concentração de sólidos presentes na fase gasosa mostrou conclusões significativas envolvendo dois parâmetros em estudo: aerodinâmica da partícula e queda de pressão no ciclone. O aumento da concentração de sólidos levou à aglomeração das partículas nas paredes do ciclone, fazendo com que sua interação com o gás e sua influência na vorticidade diminuíssem. Neste caso, houve redução da queda de pressão. Porém, este efeito não foi linear, observando-se que a queda de pressão voltava a aumentar com o

aumento da concentração de sólidos na corrente gasosa. Um problema deste trabalho foi que todos os resultados eram aplicáveis apenas a ciclones geometricamente simétricos aos utilizados nos ensaios. Para se verificar a possibilidade de usar as equações descritas no modelo para cálculo de transferência de calor em ciclones com diferentes geometrias, especialmente no caso de se trabalhar com altas concentrações de sólidos, seria necessário melhorar os dados com experimentos adicionais.

DYAKOWSKY *et al.* (1993) realizaram um trabalho cujo objetivo foi o de modelar o escoamento turbulento dentro de um hidrociclone, pela análise de um escoamento estacionário, turbulento e axi-simétrico. O modelo proposto foi baseado numa revisão das aproximações do modelo proposto por Saffman (1974) para pequenos diâmetros, que usou o modelo k- ϵ combinado com equações para os tensores de Reynolds. Esta revisão incluiu se levar em consideração a anisotropia da viscosidade turbulenta. O modelo de zero-equações proposto por Speziale (1991) foi aplicado no método analítico proposto para a solução do conjunto das equações que descreviam o processo. Ainda, o escoamento foi caracterizado como rotacional e tendo viscosidade constante. E foi negligenciada a influência da fase sólida sobre a fase fluida. A análise foi baseada em dois campos de pesquisa. O primeiro caso considerou a ausência de uma sonda no interior do ciclone e o segundo caso considerou a presença desta sonda e sua influência sobre as propriedades do escoamento dentro do hidrociclone. Os ciclones estudados tinham 10, 22 e 44 mm de diâmetro. O procedimento incorporou uma malha numérica deslocada, para as velocidades axial e radial e a solução das equações algébricas foi feita utilizando-se o método iterativo linha por linha com TDMA. O modelo assume a simetria por meio da aproximação da entrada tangencial tridimensional para uma entrada bidimensional. Medidas experimentais foram utilizadas para a corroboração dos experimentos numéricos, usando “Laser Doppler Anemometry” (LDA) e “Laser Doppler Velocimeter” (LDV). Os resultados indicaram que o modelo forneceu boa concordância com os dados experimentais para ciclones de pequenos diâmetros (10 mm) nos quais as linhas de corrente apresentaram efeitos de curvatura maiores. Com relação ao segundo caso, resultados mostraram que a presença de uma haste (sonda) no interior do ciclone causou um aumento na velocidade tangencial e seu gradiente na direção radial. Por conseguinte, os autores concluíram que se a velocidade tangencial, próxima à superfície da haste, diminui mais rapidamente do que no caso convencional de um vórtex forçado, isto poderia diminuir a quantidade de partículas

pequenas carregadas pela corrente de saída e, então, aumentar a eficiência do hidrociclone, útil para processos de tratamento de efluentes e lodos.

CRISTEA *et al.*(1994) apresentaram à comunidade científica, usuária de códigos comerciais para simulação de ciclones, um estudo preliminar da simulação tridimensional (3D) num ciclone, de um escoamento multifásico turbulento proveniente de uma suspensão pré-aquecida de um forno de cimento. Eles apresentaram pela primeira vez um trabalho realizado com o código comercial de simulação matemática denominado FLUENT, na versão 4.2. Buscou-se avaliar a performance de ciclones através da eficiência de separação e queda de pressão. O artigo apresentou algumas informações sobre a simulação bidimensional (2D) - simetria axial, considerando invariantes as propriedades termodinâmicas e de transporte dentro do ciclone. Os principais objetivos deste estudo concentraram-se em avaliar a influência do refinamento da malha, esquemas de discretização, tipo de modelo de turbulência e condições de contorno para uma correta simulação do processo físico. O modelo dos tensores de Reynolds foi usado para turbulência, pois o modelo k- ϵ padrão não pode ser usado por não comportar efeitos anisotrópicos da viscosidade turbulenta. Os autores concluíram que, no caso da simulação, o refinamento da malha não influencia a distribuição dos componentes radial e axial de velocidade, de modo que se pode trabalhar com uma malha não refinada e um esquema de discretização do tipo QUICK. Uma boa concordância entre os dados experimentais e os resultados, nos modelos 2D e 3D, foi obtida neste trabalho, no que se refere aos dados de componentes da velocidade média e flutuante, eficiência e performance do ciclone. Porém, algumas discrepâncias foram encontradas entre os resultados obtidos pelo modelo e os dados experimentais no estudo do vórtice do escoamento. O código FLUENT forneceu resultados da simulação numa velocidade maior do que aquela obtida com outros códigos comerciais de fluidodinâmica computacional avaliados anteriormente. Os autores ressaltaram que a boa concordância obtida restringiu-se particularmente ao tipo de estudo realizado, o qual incluiu escoamentos multifásicos diluídos apenas. Não foi considerado o efeito de interação partícula-partícula na fase particulada. Conseqüentemente, os autores alertam para a realização de novos trabalhos visando o aprofundamento de pesquisas nestas deficiências apontadas.

AVEREOUS *et al.* (1997) apresentaram os resultados de um estudo referente à trajetória e ao mecanismo de classificação de partículas sólidas presentes, em concentrações baixas, num escoamento em hidrociclones, baseado num padrão de escoamento axi-simétrico geral usando o código comercial FLUENT, uma ferramenta da fluidodinâmica computacional. Foi desenvolvido um modelo probabilístico simples para a determinação da trajetória das partículas e da curva de separação. Eles se basearam no fato de que a probabilidade de encontrar a partícula após um dado intervalo de tempo é igual a uma curva Gaussiana de excentricidade dada pela integração das equações de movimento das partículas no escoamento e de extensão à translação radial turbulenta característica. Pode-se, então, computar iterativamente a difusão desta partícula presente numa distribuição de probabilidade numa malha para cada intervalo de tempo seguinte à injeção da partícula ao hidrociclone. O modelo de turbulência usado foi o modelo dos tensores de Reynolds (RSM). O modelo probabilístico forneceu ótimos resultados para o estudo de mudanças de parâmetros como viscosidade, geometria e condições de entrada, sendo tais resultados corroborados pelos resultados das simulações usando o FLUENT. Trabalhos futuros devem incluir efeitos de concentração de partículas e anisotropia no modelo de turbulência usado, afirmam os autores. O artigo perde em qualidade quanto à ausência da descrição da metodologia empregada no trabalho, resumindo-se a uma comunicação técnica dos resultados obtidos. Porém, o trabalho é válido por apresentar um modelo teórico simples para o estudo do comportamento das partículas em hidrociclones.

MEIER (1998) apresentou, em sua tese de doutorado, uma modelagem fenomenológica, baseada nos princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento, sob a ótica das médias volumétricas, e generalizada para representar o escoamento multifásico vorticial em ciclones. O modelo geral foi particularizado a partir de hipóteses adicionais, dando origem a três modelos distintos. O primeiro, dedicado à simulação do escoamento de ar isento de particulados - Modelo Euleriano Monofásico Bidimensional (EMB) - considerou que a fase sólida não exerce influência sobre a fase gasosa, sendo adequado para analisar fenômenos como alta preservação de vorticidade, reversão de escoamento, zonas de recirculação, anisotropia dos tensores de Reynolds e efeitos do sistema coletor de sólidos sobre o campo de escoamento do gás. O segundo modelo considerou que as partículas poderiam ser caracterizadas como esféricas e com um diâmetro constante, e que o aglomerado de partículas comportava-se como um fluido

invíscido, sob um referencial Euleriano- Modelo Euleriano Euleriano Bifásico e Bidimensional (EEBB)- permitindo a atribuição de efeitos da fase sólida sobre a fase gasosa, tais como a atenuação do escoamento vorticial e a conseqüente queda de pressão, possibilitando a avaliação da queda de pressão em ciclones. E, finalmente, a terceira versão acoplou o modelo EEBB com um modelo Lagrangeano- o Modelo Euleriano-Euleriano-Lagrangeano Bidimensional (EELB)- possibilitando a predição da trajetória das partículas dependendo do seu diâmetro e de sua posição inicial na entrada do ciclone, a partir de um campo de escoamento do gás obtido sob a influência da fase particulada. Com o conhecimento das trajetórias para cada diâmetro de partícula, obteve-se o subsídio necessário à predição da curva de eficiência de coleta e da eficiência global do ciclone. Foi desenvolvido um programa computacional baseado na aplicação do método dos volumes finitos com acoplamento pressão-velocidade do tipo SIMPLE e malha numérica deslocada, para a solução segregada das equações provenientes dos três modelos. Os principais resultados deste trabalho mostraram que a metodologia empregada, baseada na técnica da fluidodinâmica computacional, mostrou-se apta aos estudos de melhoria de performance de ciclones, quantificada, principalmente, por reduzida queda de pressão e alta eficiência de coleta. O autor, porém, aponta para a necessidade e a importância de se realizar a modelagem e simulação de ciclones com modelos tridimensionais, para a análise dos efeitos da entrada tridimensional e a validade da hipótese de transformação da entrada tridimensional assimétrica para uma entrada tridimensional simétrica, e comparar com os resultados bidimensionais obtidos neste trabalho. Há também a necessidade de seleção de novos casos para a validação do modelo EEBB para o escoamento do gás em ciclones, especialmente contendo informações experimentais detalhadas e precisas sobre queda de pressão na presença e na ausência da fase particulada. A definição de casos reais de aplicação de ciclones como, por exemplo, os ciclones secundários das unidades de craqueamento catalítico de petróleo, para a realização de estudos de melhoria de performance a partir de soluções do modelo EMB, do modelo EEBB e EELB também forneceria subsídios para a validação destes modelos.

CRISTEA *et al.* (1998) descreveram a simulação 3D de um escoamento ciclônico bifásico concentrado, medindo os componentes vetoriais da velocidade média e flutuante, queda de pressão e eficiência global de coleta para a fase contínua (gás) e descontínua (particulada). A simulação numérica foi realizada usando FLUENT/Uns[®], um código

baseado no método dos volumes finitos. O modelo de turbulência usado foi RSM (Modelo dos Tensores de Reynolds-“Reynolds-Stress Model”), sistema de acoplamento pressão-velocidade SIMPLE e esquema de interpolação UPWIND, baseados no método dos volumes finitos. Um modelo Euleriano-Lagrangeano foi adotado para a simulação do escoamento bifásico disperso, devido à alta concentração de sólidos presentes na corrente gasosa. A solução convergente do campo de escoamento da fase contínua foi usada para realizar a simulação do escoamento da fase descontínua, expressa num modelo Lagrangeano. Os resultados computacionais apresentaram boa concordância com os dados experimentais (obtidos com a utilização de “Laser Doppler Anemometer” - LDA) para os componentes da velocidade média na fase contínua; a influência do campo de velocidades flutuantes das fases contínua e descontínua foi predita razoavelmente bem usando o modelo de turbulência RSM, permitindo-se a observação de regiões de formação de vórtice (livre e forçado) e zonas de recirculação interna no ciclone. As trajetórias numericamente simuladas para as partículas de diferentes tamanhos forneceram subsídios úteis para o projeto de ciclones como separadores de partículas. Os autores ressaltam que este trabalho é parte do esforço despendido em pesquisas visando a validação de ferramentas computacionais que vêm sendo usadas por engenheiros e projetistas.

MEIER e MORI (1998) relataram um trabalho no qual um modelo fluidodinâmico computacional foi usado para simular o escoamento gás-sólido diluído, num ciclone convencional. A maioria dos estudos publicados na literatura apresenta modelos para a fase sólida. Neste trabalho, o modelo foi baseado na abordagem Euleriana para ambas as fases, considerando os dois fluidos hipotéticos num domínio tridimensional. O modelo matemático foi completado usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$, que foi utilizado para prever a viscosidade turbulenta dos componentes radial e axial dos tensores de Reynolds da fase gasosa. Ainda, para a velocidade tangencial da fase gasosa, a teoria do comprimento de mistura de Prandtl foi usada para prever os componentes tangenciais dos tensores de Reynolds, e uma função de parede foi usada para prever o turbilhão próximo à parede. Este modelo de turbulência apresenta um comportamento anisotrópico dos tensores de Reynolds na fase gasosa. O escoamento da fase sólida foi considerado como sendo um escoamento com viscosidade nula e apenas um modelo para a força de arraste foi usado para a interação gás-sólido. Duas situações físicas foram usadas para testar o modelo proposto: a primeira delas foi referente ao escoamento do ar limpo e a outra foi referente ao ar e partículas

esféricas de vidro no escoamento diluído. A informação primária obtida do modelo foi a influência da fase sólida sobre a fase gasosa. Foi possível prever a redução do pico de velocidade tangencial responsável pela redução da queda de pressão, devido à presença das partículas. Também concluíram que a abordagem Euleriana-Euleriana pode ser usada para introduzir os efeitos de sólidos na simulação do escoamento gás-sólido em ciclones. Ainda, relataram que o modelo Lagrangeano, acoplado com a abordagem Euleriana-Euleriana, pode ser usado para prever a eficiência de coleta de ciclones. Este trabalho foi uma extensão da tese de doutorado de Meier (1998) no qual os autores reforçaram a possibilidade de se obter uma solução estável em estado estacionário usando um modelo invíscido para a fase sólida.

HOEKSTRA *et al.*(1999) publicaram um trabalho cujo objetivo foi avaliar a performance de modelos de turbulência, tais como o modelo k- ϵ padrão, o modelo RNG-k- ϵ (“Re-Normalization Group”) o modelo RSTM (“Reynolds Stress Transport Model”) na predição do campo de escoamento turbulento do gás num separador ciclônico. Não foi considerada neste estudo a influência da fase sólida no escoamento. Os componentes de velocidade axial e tangencial foram medidos na zona de separação do ciclone por medidas de Laser Doppler Velocimeter (LDV). Estas medidas foram feitas num modelo de ciclone com o duto de saída de gás com diâmetros cujos valores eram 0,19 m, 0,135 m e 0,108 m. Os resultados experimentais revelaram uma forte influência do diâmetro do duto de saída do gás nas características do meio escoante. A redução deste diâmetro resultou no aumento acentuado da velocidade tangencial máxima de 1 a 2,5 vezes a velocidade de entrada. A geometria 3D da entrada do ciclone foi convertida numa geometria assimétrica. A simulação foi feita utilizando o código comercial FLUENT V4.47, embasada pelo método dos volumes finitos. Foi utilizada uma malha de 15000 células e o esquema de interpolação QUICK. Os resultados da simulação indicaram que o modelo k- ϵ padrão previu resultados bem acima daqueles obtidos experimentalmente. Com modelo RNG- k- ϵ , a predição também foi superestimada nos casos de estudo do perfil do turbilhão, quando se trabalhou com grandes diâmetros para o duto de saída do gás. Para os demais casos, no entanto, o modelo falhou na predição da distribuição do vórtice livre na região de saída do escoamento. Em contraste com os modelos de viscosidade turbulenta, o modelo RSTM foi capaz de reproduzir as características principais dos perfis de velocidade tangencial

medidos. Uma discrepância, entretanto, foi observada para todos os dutos de saída em relação ao tamanho do núcleo do vórtice e à magnitude da velocidade tangencial máxima. O estudo não considerou as características de performance, como eficiência de coleta e queda de pressão.

MEIER *et al.* (1999) apresentaram uma comparação entre dois modelos de turbulência: o modelo isotrópico k- ϵ e um modelo anisotrópico composto de uma combinação do modelo k- ϵ e o modelo de comprimento de mistura de Prandtl generalizado. Como justificativa, este novo modelo possibilitaria melhorar a predição de reversão de escoamento, a existência de zonas de recirculação e de alta vorticidade, o fenômeno de escoamento descendente e o efeito do sistema coletor de particulados, no escoamento do gás em ciclones. O comportamento anisotrópico dos tensores de Reynolds foi considerado para a fase contínua, e a fase particulada foi considerada como sendo um fluido invíscido. A técnica fluidodinâmica computacional foi usada para resolver numericamente a equação diferencial parcial usando o método dos volumes finitos, com o método SIMPLEC como acoplamento pressão-velocidade escolhido. Utilizou-se uma malha numérica deslocada. Meier e Mori (1998) usaram o modelo gás-sólido para simular o escoamento de gás e partículas esféricas de vidro, e os resultados mostraram a influência das partículas no escoamento do gás. Neste trabalho, estes autores conduziram experimentos numéricos com um modelo fluidodinâmico anisotrópico bidimensional, usado para analisar a anisotropia dos tensores de Reynolds. Os principais resultados desta nova pesquisa revelaram que o modelo isotrópico de turbulência não foi capaz de prever satisfatoriamente o escoamento turbulento em ciclones. Já o modelo anisotrópico de turbulência foi capaz de prever com sucesso o escoamento turbulento em ciclones, mostrando fenômenos tais como zonas de recirculação, alta preservação de vórtice, escoamento descendente, reversão de escoamento e efeitos do sistema de coleta no campo do gás. O modelo gás-sólido proposto neste trabalho foi hábil em simular o escoamento gás-sólido em ciclones, com boa concordância de eficiência global de coleta e dados experimentais, mostrou ainda o comportamento realístico da fração volumétrica da fase sólida. A validação deste modelo foi feita tomando o ciclone apresentado nos trabalhos de Hoffmann *et al.* (1992) como estudo de caso, por causa de sua aplicação em unidades de FCC.

MA et al. (2000) apresentaram simulações numéricas de escoamentos de fluido e partículas neste artigo, para uma série de pequenos ciclones (ciclones experimentais), os quais também foram investigados experimentalmente por Kim et al. (1990), sendo que as dimensões de alguns ciclones foram estendidas além das dimensões originais usadas por Kim et al. (1990). Foi assumido que a presença das partículas não afeta o escoamento do fluido no ciclone, devido ao fato de que a carga de sólidos é muito baixa no escoamento dos ciclones usados para amostragem de ar. As equações que regem o escoamento de fluidos, juntamente com as equações do modelo turbulento RNG (Re-Normalization Group), foram resolvidas usando o método dos volumes finitos. Neste artigo, uma técnica de simulação numérica foi empregada para determinar o escoamento de fluido e a penetração da partícula através de um grupo de pequenos ciclones, com o intuito de fornecer uma alternativa à abordagem geral de usar investigações experimentais em tempo real em ciclones. O modelo de turbulência RNG-k- ϵ foi empregado para a simulação do escoamento de fluido turbulento altamente rotacional, o qual é considerado como o mais conveniente modelo de turbulência. Como resultado, uma boa concordância foi obtida entre as previsões numéricas e os poucos dados experimentais disponíveis de Kim et al. (1990). Pela ampliação na simulação do movimento de pequenas partículas através do código CFD, pôde ser conduzida uma investigação sistemática acerca da influência dos principais parâmetros na performance geral do ciclone com um custo efetivo baixo.

PERES et al. (2002) apresentaram um trabalho contendo resultados experimentais e também de simulação numérica para o estudo do escoamento do gás num ciclone. O objetivo do trabalho, segundo os autores, foi avaliar um modelo anisotrópico de turbulência, conhecido como DSM (“Diferential Stress Model”), usando esquemas de interpolação de alta ordem. No que se refere à simulação numérica, o código computacional em CFD utilizado foi o CFX 4.4, enquanto que a parte experimental baseou-se na obtenção de dados de pressão, localizados em pontos previamente selecionados para a determinação posterior da distribuição radial dos componentes da velocidade tangencial, em cinco posições axiais através do equipamento. Os resultados apontaram para o fato de que a associação entre o modelo DSM e esquemas de interpolação de alta ordem (UPWIND de segunda ordem e QUICK) mostraram uma boa capacidade em representar os fenômenos do escoamento no ciclone, apresentando uma boa concordância entre os esquemas de

interpolação usados. Os autores salientam que existiram alguns problemas quanto à convergência e instabilidade na solução numérica, os quais podem ser minimizados a partir da escolha de procedimentos apropriados de solução. Os modelos mostraram uma satisfatória capacidade em prever o comportamento dinâmico de fluido, dada a boa concordância obtida com os resultados experimentais.

BRICOUT e LOUGE (2004) apresentaram uma revisão dos trabalhos de Shepperd e Lapple (1939), Alexander (1949), Stairmand (1951) e Barth (1956) para adaptar a teoria corrente às medidas de queda de pressão e eficiência de coleta de ciclones em condições análogas a leitos fluidizados circulantes. Os trabalhos de base deram avanço aos modelos de aumento de refinamento na predição de perda de pressão e eficiência de ciclones em termos de parâmetros de projeto e velocidade de entrada de gás. Uma vez que no passado, muitas aplicações de engenharia envolviam fluxos diluídos, estes autores apenas consideraram cargas de sólido de três a seis vezes menores em ordem de magnitude que aquelas encontradas em PCFBs (leitos fluidizados pressurizados com circulação). Os autores buscaram um elo entre as correlações propostas no passado e o estágio atual de estudo dos ciclones. Concluíram que uma dificuldade das teorias correntes é a hipótese empírica que a distribuição de sólidos na entrada do ciclone é uniforme. Infelizmente, qualquer artifício prático de gás-sólido produz consideráveis não-homogeneidades na concentração de sólidos. Num riser CFB (leitos fluidizados com circulação), sólidos tendem a acumular na parede. Além disso, eles freqüentemente congregam em ‘cordas’ que se originam no riser e giram para baixo do ciclone. Desta maneira, a eficiência obtida depende não apenas da geometria do ciclone, mas também do comportamento do fluxo na entrada.

ZHAO *et al.* (2004) projetaram três ciclones com diferentes geometrias de entrada, que incluem uma entrada única tangencial convencional (CTSI), uma entrada direta simétrica espiralada (DSSI), e uma entrada convergente simétrica espiralada (CSSI). Os efeitos do tipo de entrada nas características de performance do ciclone, incluindo a eficiência de coleta e a queda de pressão, foram investigados e comparados como função do tamanho de partícula e da taxa de fluxo. Todas as outras dimensões foram projetadas igualmente. Os resultados experimentais indicaram que a entrada simétrica espiralada (SSI), especialmente a geometria de entrada CSSI, aumenta significativamente a eficiência

de coleta com aumento insignificante na queda de pressão. Os resultados da eficiência de coleta e queda de pressão comparados entre os dados experimentais e modelos teóricos também foram envolvidos. Os resultados experimentais mostraram que a eficiência global do ciclone DSSI e do CSSI é maior por 0,15-1,15% e 0,40-2,40% que para o ciclone CTSI, nas faixas de velocidades testadas (11,99-23,85 m/s), e a eficiência é maior por 2-10% e 5-20%. A queda de pressão através de um ciclone é normalmente expressa pelo coeficiente de perda de carga, que é a divisão da queda de pressão pela pressão cinética na entrada $\rho_g v_i^2 / 2$. Alta queda de pressão está associada com alta taxa de fluxo para um dado ciclone. O coeficiente de queda de pressão é 5,63 para o ciclone DSSI, 5,67 para o ciclone CSSI e 5,55 para o ciclone CTSI. Os resultados experimentais comparados aos teóricos mostraram que os modelos de Alexander e de Barth para queda de pressão proveram uma melhor correlação com os dados experimentais.

NORILER *et al.* (2004) apresentaram uma nova alternativa mecânica para melhorar o fluxo de gás em ciclones através da redução da queda de pressão. Este comportamento ocorre devido aos efeitos de fenômenos de colapsos turbilhonares na entrada do tubo de saída do gás. A alternativa consiste de um tubo com duas entradas de gás em um oposto fluxo espiral que produz uma súbita redução na máxima velocidade tangencial responsável por praticamente 80% da queda de pressão em ciclones. A máxima redução causa uma diminuição na queda de pressão pelo colapso do turbilhão, e por causa disso as partículas sólidas tendem a se mover rapidamente em direção à parede, aumentando a eficiência de coleta e uma redução no consumo de energia no processo de separação. Como resultado deste fenômeno, a performance global de ciclones é aperfeiçoada. Simulações numéricas tridimensionais, transientes, turbulência anisotrópica fechada pela tensão diferencial de Reynolds para geometrias padrão de Lapple e Stairmand de 0,3 m de diâmetro, mostraram uma redução da queda de pressão de 20% e uma mudança da máxima velocidade tangencial através da parede. Todos os experimentos numéricos foram efetuados com um código comercial de CFD (CFX 4.4) mostrando estabilidade numérica e boas taxas de convergência com esquemas de interpolação de alta-ordem (higher UPWIND), acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC e outras características numéricas. O método numérico utilizado para resolver o modelo matemático foi o método dos volumes finitos

com uma estrutura multiblocos em um sistema de coordenadas generalizadas para malha numérica. O algoritmo de Rhie Chow com o procedimento AMG (multi-malhas algébricas) para a solução de sistemas de equações foi usado para prevenir erros numéricos como 'check-boarding' e 'zig zag' devido à malha utilizada. Neste caso, todas as variáveis são calculadas no centro de cada célula, e erros devido a não-ortogonalidade das células são generalizados durante a construção da estrutura numérica. O diferencial de pressão entre o centro do ciclone e as periferias diminuem. Para a alternativa mecânica estudada, a região de alta-pressão é concentrada perto da parede, e a de baixa-pressão é concentrada exclusivamente na região de saída de gás. As regiões de alta velocidade tangencial são transferidas para a região perto da parede, concentrando o campo centrífugo que é responsável pelo aumento na eficiência de coleta. O sistema gás-sólido não foi analisado nesse trabalho.

CAPÍTULO 03

OBJETIVOS

“Uma coisa posso afirmar e provar com palavras e atos: é que nos tornamos melhores se cremos que é nosso dever seguir em busca da verdade desconhecida.”

(Sócrates)

3.1: Objetivos Gerais

O desenvolvimento deste trabalho está centrado na busca de informações que contribuam para a compreensão das características pertinentes à complexa fluidodinâmica do escoamento no interior de um ciclone. Através de experimentos numéricos, envolvendo modelos contidos em softwares especializados em CFD, objetiva-se coletar resultados de inestimável valor tanto na resolução de problemas de otimização do processo de operação dos ciclones, contribuindo para a melhora de sua eficiência, quanto fornecer subsídios para o aprimoramento de um modelo CFD tridimensional para ciclones. Desta forma, busca-se ampliar o leque de informações acerca do escoamento do gás e do escoamento gás-sólido em ciclones, dando continuidade à linha de pesquisa em desenvolvimento no Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos – LMSPQ – FEQ-UNICAMP.

3.2: Objetivos Específicos

Os pontos de investigação específicos são:

1. Grande parte dos trabalhos consultados sobre simulação computacional de ciclones faz uso da hipótese simplificadora da simetria axial para reduzir um problema tridimensional a bidimensional, com o argumento de que os resultados numéricos obtidos com uma modelagem bidimensional refinada apresentam melhores características, quando comparados com dados experimentais, do que aqueles obtidos via modelo tridimensional com uma malha numérica não tão refinada. No entanto,

trabalhos como os de Meier (1998), Meier e Mori (1998), Meier (1999) e Peres (2002) demonstraram que a hipótese de simetria axial não corresponde satisfatoriamente à realidade. Sendo assim, este trabalho tem como premissa realizar a aplicação do refino da malha numérica num modelo tridimensional, para que se obtenha uma melhor representação do escoamento turbulento em ciclones.

2. Uma vez que a utilização de modelos de turbulência isotrópicos, por exemplo $k-\varepsilon$, ou até mesmo de modelos anisotrópicos (modelo híbrido, modelo $k-\varepsilon$ modificado e modelo das tensões algébricas (RSM)) para a representação da turbulência é ainda motivo de muita discussão, pretende-se, no transcorrer deste projeto, realizar uma análise do padrão de escoamento obtido mediante o uso de novos modelos de turbulência, disponíveis em ferramentas computacionais, na busca pelo melhor entendimento do fenômeno do escoamento no interior de um ciclone.
3. Alguns trabalhos anteriores aos de Meier (1998) avaliaram a performance de ciclones pela consideração de um modelo euleriano-lagrangeano, em que os efeitos da fase descontínua sobre a fase contínua são negligenciados, isto é, o campo de escoamento do gás é calculado independentemente da presença da fase particulada e, em seguida, a trajetória das partículas é obtida com aquele campo. Analisar-se-á a adequação de um modelo euleriano-euleriano-lagrangeano como os de Meier (1998), Meier e Mori (1998, 1999), os quais consideram a influência de um diâmetro médio da fase particulada, por um modelo de dois fluidos interpenetrantes, ao modelo tridimensional.
4. Avaliação de ferramentas computacionais disponíveis na área de Fluidodinâmica Computacional (CFD), tais como o pré-processador ICFM CFD Hexa (na confecção de geometrias e malhas numéricas) e os softwares Fluent e CFX (na realização dos experimentos numéricos), necessários ao desenvolvimento deste trabalho.
5. Avaliar a influência da alteração de parâmetros geométricos de um ciclone (tipos de seções de entrada, inclinação da seção de entrada e diâmetro do finder) na fluidodinâmica de seu escoamento e nos parâmetros de performance do equipamento. Neste caso, estudar-se-á a alteração da seção de entrada de ciclones, inclinando-as em 30° , 45° e 60° em relação ao corpo do equipamento, avaliando o impacto destas

alterações em parâmetros como fluidodinâmica de escoamento, eficiência de coleta e queda de pressão.

3.3- Estudo de Casos

Tabela 3.1: Características dos estudos de caso para o escoamento monofásico.

PROPRIEDADES		<u>Caso 01:</u> Patterson e Munz (1996)	<u>Caso 02:</u> Yuu <i>et al.</i> (1978)	<u>Caso 03 :</u> Yuu <i>et al.</i> (1978)
Condições Operacionais	Velocidade na entrada (m/s)	15,20	9,80	13,40
	Vazão de gás (m ³ /s)	0,019613	0,05929	0,10890
	Fluido	Ar Limpo	Ar Limpo	Ar Limpo
	Temperatura (K)	300,00	293,15	293,15
	Re _{Dh}	31776,82	44363,10	81483,24
Propriedades Físicas	ρ (kg/m ³)	1,142	1,142	1,142
	μ (kg/m.s)	1,85.10 ⁻⁵	1,85.10 ⁻⁵	1,85.10 ⁻⁵
Propriedades Geométricas *	K(m)	0,0508	0,1100	0,1100
	A (m)	0,4060	0,6200	0,6200
	L (m)	0,0254	0,0550	0,0550
	F (m)	0,1080	0,1600	0,1600
	D(m)	0,1020	0,2960	0,2960
	M (m)	0,0254	0,152	0,152

* As propriedades geométricas correspondem àquelas especificados na Figura 1.1, página 05, capítulo 1.

Para o desenvolvimento dos trabalhos, foram selecionados estudos de casos disponíveis na literatura, os quais apresentam resultados experimentais. Na Tabela 3.1, estão apresentados os estudos de caso para a fase da pesquisa envolvendo o escoamento

monofásico (gasoso). E nas Tabelas 3.2 e 3.3, encontram-se os estudos de casos relativos aos experimentos numéricos que envolverão o escoamento bifásico.

3.3.1: Caso Yuu *et al.* (1978)

Neste trabalho, os autores propuseram a realização de experimentos com o intuito de estudar as características do escoamento do gás e de gás-sólido num ciclone de bancada. O objetivo era avaliar o efeito da carga de sólidos na queda de pressão num ciclone convencional. Os parâmetros geométricos e as condições experimentais estão relatados na Tabela 3.1. Os resultados mostraram que a presença de particulados na corrente gasosa reduziu a queda de pressão do ciclone em mais de 30%, mesmo considerando as baixas concentrações de sólidos usadas nos experimentos, tais como aquela apresentada na Tabela 3.2. Na faixa de concentração de sólidos de 1,5 a 50 g/m³, a relação entre a queda de pressão para os escoamentos monofásico e bifásico, com a mesma velocidade de entrada, mostrou-se independente da concentração de sólidos, mantendo-se aproximadamente constante; mas tal relação diminuiu com o aumento da concentração acima de 50 g/m³. Foi observado também que a presença de sólidos reduziu a velocidade tangencial do gás.

3.3.2: Caso Patterson e Munz (1996)

Neste trabalho, os autores apresentaram resultados experimentais referentes a um estudo de escoamentos de gás e também gás contendo partículas sólidas, com temperaturas variando entre 300 e 2000K. As características deste estudo estão relatadas na Tabela 3.1. As velocidades do gás de entrada variaram de 3 a 42 m/s (para nosso estudo adotamos os ensaios realizados com $v = 15,2$ m/s). Modelos de deposição de partículas e as medidas de pressão foram usados para determinar as características do escoamento e os perfis de velocidade dentro do ciclone.

Outro estudo de caso envolvendo o estudo do escoamento gás-sólido foi retirado do trabalho de Patterson e Munz (1989), no qual resultados experimentais referentes a separações gás-sólido foram obtidos para um ciclone convencional de 102 mm de diâmetro. Dados de eficiência de coleta foram medidos para partículas de sílica de 10 µm. As velocidades de entrada variaram entre 2,75 e 15,2 m/s para o caso da tese. A evidência para utilização deste caso baseou-se na disponibilidade de dados experimentais, os quais são necessários para a corroboração dos modelos propostos nos trabalhos desta tese.

Tabela 3.2: Características do estudo de caso para o escoamento bifásico: Caso 04 –Yuu *et al.* (1978).

PROPRIEDADES		Caso 04: Yuu <i>et al.</i> (1978)
Condições Operacionais	Velocidade do Gás na entrada (m/s)	9,80
	Velocidade do Sólido na entrada (m/s)	9,80
	Vazão de Gás (m ³ /s)	5,93.10 ⁻²
	Vazão de Sólidos (m ³ /h)	3,18211x10 ⁻⁶
Fase Sólida	Material	Pó de PVC
	Diâmetro da Partícula (μ m)	163
	Massa Específica (kg/m ³)	1330
	Fração Volumétrica de Sólidos na Entrada	5,32302.10 ⁻⁵
Fase Gasosa	Material	Ar
	Massa Específica (kg/m ³)	1,142
	Viscosidade (kg/m.s)	1,85.10 ⁻⁵

3.3.3- Caso Patterson e Munz (1989)

Neste trabalho, eficiências de coleta foram medidas num ciclone com diâmetro de 102 mm, e cujas demais características geométricas encontram-se na Tabela 3.1. Os ensaios foram realizados tanto à temperatura ambiente quanto a altas temperaturas. O material sólido de trabalho constituiu-se de sílica e de alumina, com diâmetros médios de 5 μ m e 10 μ m, respectivamente. As condições operacionais deste estudo de caso encontram-se na Tabela 3.3, a seguir.

Tabela 3.3: Características do estudo de caso para o escoamento bifásico: Caso 05- Patterson e Munz (1989).

PROPRIEDADES		Caso 05: Patterson e Munz (1989)
Condições Operacionais	Velocidade do Gás na entrada (m/s)	15,2
	Velocidade do Sólido na entrada (m/s)	15,2
	Vazão de Gás (m ³ /s)	1,9613.10 ⁻²
	Vazão de Sólidos (m ³ /h)	3,18211.10 ⁻⁶
Fase Sólida	Material	sílica
	Diâmetro da Partícula (μ m)	10
	Massa Específica (kg/m ³)	2600
	Fração Volumétrica de Sólidos na Entrada	6,13.10 ⁻⁵
Fase Gasosa	Material	Ar
	Massa Específica (kg/m ³)	1,142
	Viscosidade (kg/m.s)	1,85.10 ⁻⁵

Observação:

- 1) Em relação ao estudo envolvendo modificações na geometria de um ciclone, o caso 05, apresentado na Tabela 3.3, foi tomado como referência. Para este caso, a literatura apresenta, adicionalmente, resultados com duas outras velocidades de entrada para o gás e para a fase particulada, quais sejam: 2,75 m/s e 7,75 m/s, além dos 15,2 m/s especificados na Tabela 3.3.
- 2) Ainda dentro da linha de avaliação de modificações geométricas em ciclones, escolheu-se para estudo de caso um ciclone com características industriais. Este estudo será apresentado no Capítulo 09 e suas propriedades geométricas e condições de operação serão descritas em detalhes naquele capítulo.

CAPÍTULO 04

MODELAGEM MATEMÁTICA

“Dois são os adjetivos que, segundo Poincaré, caracterizam o raciocínio matemático: rigoroso e fecundo.”

(Louis Johannot)

4.1- Apresentação

Neste capítulo é apresentada a modelagem matemática aplicada para a realização dos experimentos numéricos. Nela, abordam-se as equações que governam o fenômeno da fluidodinâmica do escoamento no interior de um ciclone. O capítulo inicia-se com a revisão dos modelos propostos por Meier (1998), no qual foi desenvolvido um modelo geral, o modelo euleriano multifásico com tratamento bidimensional, e em seguida, foram realizadas as particularizações deste modelo para o escoamento monofásico e para o escoamento bifásico gás-sólido em ciclones. Posteriormente, são descritos cada um dos modelos de turbulência a serem aplicados nos experimentos numéricos deste trabalho.

Apresenta-se, ainda, um estudo revisado sobre o fenômeno da turbulência e sua evolução ao longo do último século. Há ainda propostas e discussão das mesmas para os modelos de turbulência usados (incluindo suas hipóteses simplificadoras) e para as equações constitutivas e as condições de contorno que foram adotadas para o fechamento dos modelos.

A inspiração para o desenvolvimento deste trabalho teve como ponto de partida os resultados alcançados com os estudos iniciados por Meier (1998), no qual foi apresentada uma modelagem fenomenológica para a simulação bidimensional de ciclones. Deste modo, os tópicos 4.2 e 4.3, pertencentes ao capítulo 4, apresentaram uma síntese do que foi exposto por Meier (1998) em seu trabalho de doutorado acerca do desenvolvimento de um modelo geral para a simulação de ciclones.

4.2- O Modelo Geral de Meier (1998)

A literatura destaca que as duas principais hipóteses simplificadoras adotadas para modelos fluidodinâmicos multifásicos são: a hipótese do contínuo e da interpenetrabilidade das fases.

Segundo Meier (1998), no domínio do contínuo todas as fases envolvidas são consideradas como matéria contínua, negligenciando-se todas as características moleculares da matéria. Já a hipótese da interpenetrabilidade das fases complementa a hipótese do contínuo, analisando as fases numa escala espacial um pouco acima da microscópica (mas ainda longe da macroscópica) de maneira que as fases possam ocupar o mesmo volume no espaço ao mesmo tempo, através de sua interpenetração (aqui, volume refere-se à célula da malha numérica). Com isto, as propriedades de transporte para todas as fases podem ser calculadas num mesmo ponto do espaço ao mesmo tempo através de uma média volumétrica (Zhou, 1993).

As equações de conservação das fases envolvidas podem ser escritas num referencial euleriano, em sua forma contínua integral ou diferencial, a partir do teorema do transporte (Slaterry, 1972).

Outra observação importante quanto ao enfoque euleriano é a de que os princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento para todas as fases são aplicados considerando-se que as variações numa porção de fluido sejam observadas por um observador fixo no espaço; já no enfoque lagrangeano, o observador move-se com a mesma velocidade de uma porção contínua de fluido (Meier, 1998).

Desta forma, a equação da conservação da massa na forma diferencial conservativa, instantânea e num referencial euleriano, pode ser escrita para uma fase genérica k a partir do teorema do transporte (Slaterry, 1972) na seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho_k f_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k f_k \mathbf{v}_k) = 0 \quad (4.1)$$

onde:

- ♦ ρ_k é a massa específica da fase k , t é o tempo e \mathbf{v}_k é o campo vetorial instantâneo de velocidade da fase k .

$$\diamond f_k = \frac{Q_k}{\sum_{k=1}^{k=n} Q_k} \quad (4.2)$$

f_k representa a fração do volume total que é ocupado pela fase k , no domínio espacial do escoamento, Q_k é a vazão volumétrica da fase k , e n é o número de fases envolvidas.

Para as fases que se comportam como fluidos reais, a equação do movimento em sua forma diferencial conservativa, instantânea e num referencial euleriano assume a forma:

$$\frac{\partial(\rho_k f_k v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k f_k v_k v_k) = -f_k \nabla p_k - f_k \nabla \cdot (T_k^{(l)}) + \rho_k f_k g - (F_{res})_k$$

com $k = 1, \dots, n_r$ (4.3)

Na equação (4.3), p_k representa a pressão atuante sobre a fase k , g o campo gravitacional, $(T_k^{(l)})$ a tensão cisalhante de origem molecular atuante sobre o fluido real, $(F_{res})_k$ a força resistiva entre a fase k e as demais fases, e n_r é o número de fases pertencentes ao escoamento.

Para as fases que se comportam como fluidos hipotéticos (aqueles que adquirem comportamento fluidodinâmico devido às interações físico-químicas com os fluidos reais) a equação do movimento em sua forma diferencial conservativa, instantânea e num referencial euleriano assume a forma:

$$\frac{\partial(\rho_k f_k v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k f_k v_k v_k) = -f_k \nabla p_k + \rho_k f_k g - (F_{res})_k \quad (4.4)$$

com $k = n_r + 1, \dots, n$ e sendo n o número total de fases envolvidas.

A diferença atribuída entre a equação do movimento para os fluidos reais e os fluidos hipotéticos está associada ao fato de que os fluidos hipotéticos não possuem uma tensão de natureza viscosa ou molecular, como ocorre com os fluidos reais. Esta tensão viscosa está associada aos choques entre as moléculas (ou o atrito entre elas). Com relação ao termo de pressão apresentado na equação (4.4), alguns autores desprezam este termo no caso da fase particulada (Zhou (1993)).

Hinze (1975) descreve um tratamento, conhecido como decomposição de Reynolds, para a abordagem estatística da turbulência, que estabelece que para cada propriedade instantânea de estado do sistema está associada uma média e uma flutuação instável e resultante de um processo turbulento. Sendo assim, associando uma média e uma flutuação a cada grandeza instantânea presente no modelo fluidodinâmico médio volumétrico, tem-se a seguinte representação genérica:

$$\xi = \bar{\xi} + \xi' \quad (4.5)$$

na qual ξ representa qualquer uma das propriedades instantâneas (v_k , f_k , ρ_k , p_k , g , $(T_k^{(0)})$, $(F_{res})_k$), etc., $\bar{\xi}$ representa seu valor médio e ξ' representa a flutuação turbulenta da propriedade.

Na caracterização do modelo geral, Meier (1998) adotou a média temporal como premissa estatística para a aplicação da decomposição de Reynolds. As principais propriedades da média temporal são:

- ◆ $\nabla \bar{\xi} = \nabla \bar{\xi}$;
- ◆ $\bar{\xi}' = 0$;
- ◆ $\overline{\xi' \gamma'} \neq 0$; (4.6)
- ◆ $\overline{a \xi} = a \bar{\xi}$, com “a” sendo uma constante qualquer;
- ◆ $\overline{\xi + \gamma} = \bar{\xi} + \bar{\gamma}$, com γ representando uma propriedade genérica.

Então, aplicando-se a decomposição de Reynolds nas equações de conservação instantâneas e levando-se em consideração que não haja flutuação no campo gravitacional e na massa específica para todas as fases envolvidas e, ainda, aplicando-se a média temporal e suas propriedades (listadas nas equações (4.6)) nas equações de conservação, obtém-se:

◆ Conservação da Massa:

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho_k f_k} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\overline{\rho_k f_k v_k} \right) = 0 \quad (4.7)$$

◆ Conservação da Quantidade de Movimento para os fluidos Reais:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left(\overline{\rho_k f_k v_k} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\overline{\rho_k f_k v_k v_k} \right) + \nabla \cdot \left[\overline{\rho_k} \left(\overline{f_k v_k v_k} + 2 \overline{v_k f_k v_k} + \overline{f_k v_k v_k} \right) \right] = \\ - \overline{f_k} \nabla p_k - \overline{f_k} \nabla p_k' - \overline{f_k} \nabla \left(T_k^{(0)} \right) + \overline{\rho_k f_k} g - \left(F_{res} \right)_k \end{aligned} \quad (4.8)$$

◆ Conservação da Quantidade de Movimento para os fluidos Hipotéticos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left(\overline{\rho_k f_k v_k} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\overline{\rho_k f_k v_k v_k} \right) + \nabla \cdot \left[\overline{\rho_k} \left(\overline{f_k v_k v_k} + 2 \overline{v_k f_k v_k} + \overline{f_k v_k v_k} \right) \right] = \\ - \overline{f_k} \nabla p_k - \overline{f_k} \nabla p_k' + \overline{\rho_k f_k} g - \left(F_{res} \right)_k \end{aligned} \quad (4.9)$$

Finalmente, o modelo fluidodinâmico geral representado pelas equações (4.7) a (4.9) apresenta basicamente as seguintes características (Meier, 1998):

- ◆ Modelo multifásico, composto tanto por fluidos reais quanto fluidos hipotéticos;
- ◆ Euleriano para todas as fases envolvidas (fluidos reais e fluidos hipotéticos);
- ◆ Escoamento turbulento para todas as fases;
- ◆ Uma vez que o componente viscoso é, na maioria das vezes, inferior ao tensor de Reynolds (turbulento), a flutuação do tensor viscoso seria de pouca importância, podendo ser negligenciado. Assim:

$$\overline{f_k \nabla p_k} \approx \overline{(F_{res})_k} \approx f_k \overline{\nabla (T_k^{(t)})} \approx 0 \quad (4.10)$$

4.3- Características do Modelo Geral de Meier (1998)

Para o estudo do escoamento do gás em ciclones, o modelo geral desenvolvido por Meier (1998), também denominado modelo Euleriano-Euleriano Multifásico Bidimensional (EEMB), foi simplificado em duas partes: a primeira, denominada de modelo Euleriano Monofásico Bidimensional (EMB), a qual avalia o escoamento apenas da fase gasosa, e o modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional (EEBB), que avalia o escoamento do gás em presença de sólidos.

O modelo EEMB tem a seguinte estrutura (Meier, 1998):

- ◆ Equações de Conservação:
 - Conservação da massa da fase k;
 - Conservação da quantidade de movimento da fase k
- ◆ Relações de Fechamento:
 - Modelos de turbulência;
 - Modelo empírico para o coeficiente de interface;
 - Condições iniciais e de contorno;
 - Propriedades físicas e de transporte da fase k;

- Propriedades geométricas;
 - Funções de parede.
- ◆ Hipóteses simplificadoras:
- Incompressibilidade da fase k : evitar a necessidade de um tratamento termodinâmico do fator de compressibilidade da fase genérica k , por considerar escoamentos isotérmicos e subsônicos;
 - A transferência da quantidade de movimento associada à dispersão turbulenta de massa pode ser negligenciada frente às transferências convectivas e dispersivas de momentum;
 - A força gravitacional atua somente na direção axial do ciclone;

Em relação às condições de contorno, elas são especificadas, para cada caso estudado, no Capítulo 05.

4.3.1- O Modelo Euleriano Monofásico Bidimensional (EMB)

O modelo EMB é obtido diretamente do modelo EEMB, por considerar a presença de somente uma fase, a fase gasosa, envolvida no processo.

Através deste modelo é possível a avaliação dos fenômenos inerentes ao escoamento de gás em ciclones, tais como i) preservação da vorticidade; ii) reversão do escoamento, iii) zonas de recirculação e efeitos do sistema coletor de sólidos sobre o campo de escoamento do gás.

4.3.2- O Modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional (EEBB)

O modelo EEBB é obtido também a partir do modelo EEMB com as seguintes simplificações:

- Presença de uma fase fluida real (fase gasosa representada pelo subscrito g) e de uma fase particulada (representada pelo subscrito s);
- A fase particulada pode ser caracterizada geometricamente a partir do diâmetro médio das partículas;
- O escoamento é diluído, de forma que o tensor de Reynolds sob a fase particulada possa ser negligenciado, conferindo, dessa maneira, um escoamento invíscido para a fase sólida;

- O fluxo turbulento de massa nas fases pode ser negligenciado, devido à sua magnitude quando comparado com os termos convectivos.

Conforme o comentário apresentado no início deste capítulo, o objetivo dos tópicos 4.2 e 4.3 foi fazer uma revisão do modelo geral desenvolvido por Meier (1998), uma vez que os resultados obtidos com a aplicação deste modelo serviram de base à proposta de simulação tridimensional de ciclones desenvolvida nesta tese. Esta abordagem foi necessária, pois muitas considerações aplicadas no fechamento dos modelos aplicados nos experimentos numéricos realizados no trabalho atual (tais como nos métodos numéricos e nas condições de contorno) foram baseadas nas conclusões obtidas por Meier (1998) através do seu modelo geral aqui apresentado.

4.4 - Modelos de Turbulência

4.4.1- Abordagem Histórica

Passados mais de um século de pesquisas, a turbulência continua sendo o maior problema não resolvido da física clássica. Enquanto muitos pesquisadores acreditam que a física básica da turbulência pode ser descrita pelas equações de Navier-Stokes, as limitações, as quais se referem à capacidade dos computadores, tornam difícil - para um futuro próximo - resolver diretamente estas equações para escoamentos turbulentos complexos de interesse tecnológico (Speziale, 1991). Por esta razão, todo cálculo para escoamentos turbulentos não triviais que apresentem elevados números de Reynolds, quer sejam estes científicos ou de engenharia, são baseados em modelos aproximados. Estes modelos podem apresentar uma variedade de formas, a saber (Speziale, 1991):

- 1- Modelos de Tensores de Reynolds, os quais permitem o cálculo de quantidades de momento, tais como velocidade média, pressão e energia cinética turbulenta;
- 2- Modelos em escala de malha refinada para simulações de grandes turbilhões, nos quais grandes turbilhões contendo energia são computados diretamente e o efeito das pequenas escalas, as quais são mais universais em termos de características, são modeladas;
- 3- Modelos Espectrais, ou de fechamento em dois pontos, os quais fornecem informações mais detalhadas sobre a estrutura da turbulência desde que estas informações sejam baseadas na correlação tensor-velocidade em dois pontos;

4- Modelos pdf baseados na função probabilidade de densidade (“probability density function” – pdf).

Speziale (1991) apresentou uma ampla revisão sobre os modelos de turbulência, traçando todo um perfil histórico do avanço nesta área.

O conceito de número de Reynolds médio foi introduzido por Osborne Reynolds em sua pesquisa sobre turbulência, no final do século XIX (Reynolds, 1895). Boussinesq (1877) introduziu o conceito de viscosidade turbulenta, ou turbilhão, como a base para um tempo médio aproximado de turbulência simples. Entretanto, somente após os anos de 1920 foi obtido o primeiro cálculo, com sucesso, de um escoamento turbulento utilizando o conceito de número de Reynolds médio e as equações de Navier-Stokes com um modelo de viscosidade turbulenta. O sucesso deveu-se, em grande parte, ao trabalho pioneiro de Prandtl (1925), que introduziu o conceito de comprimento de mistura como uma base para a determinação da viscosidade turbulenta. Este modelo baseado no comprimento de mistura levou a soluções de forma aproximada para escoamentos turbulentos em canais e dutos que foram notavelmente bem sucedidos em confronto com dados experimentais existentes à época. Diversos pesquisadores – mais notadamente von Kármán (1930, 1948) - fizeram contribuições adicionais à aproximação da teoria do comprimento de mistura, as quais continuaram sendo uma área de pesquisa altamente ativa até o período que sucedeu a 2ª guerra mundial. Neste período, ficou claro que as suposições básicas por trás da abordagem da teoria do comprimento de mistura – a qual faz analogia direta entre processos de transporte turbulento e processos de transporte molecular - eram não-realísticas; escoamentos turbulentos não têm uma separação de escalas transparente.

Com o objetivo de desenvolver modelos mais gerais, Prandtl (1945) vinculou a viscosidade turbulenta à energia cinética turbulenta, a qual foi obtida de uma equação de transporte modelada separadamente. Isto foi o precursor para o modelo de uma equação para a turbulência -ou o então denominado modelo k-l –no qual a escala de comprimento da turbulência, “l”, é especificada empiricamente e a energia cinética turbulenta, “k”, é obtida de uma equação modelada de transporte. Entretanto, estes modelos ainda experimentaram as deficiências intrínsecas a todos os modelos para a viscosidade turbulenta, ou seja, a incapacidade de associar a curvatura aerodinâmica, o corpo de forças e efeito nos componentes individuais dos tensores de Reynolds.

Rotta (1951) apresentou uma aproximação completa dos tensores de Reynolds para a turbulência, a qual modificou o curso do modelo dos tensores de Reynolds. Esta nova

abordagem-a qual é referida como aproximação por duas equações ou de segundo momento - foi baseada na equação de transporte dos tensores de Reynolds. Fazendo uso de algumas das idéias estatísticas de A.M. Kolmogorov nos anos de 1940 (e introduzindo novas idéias também), Rotta obteve êxito no fechamento das equações de transporte para os tensores de Reynolds. Este fechamento, diferente dos modelos para viscosidade turbulenta, considerou tanto os efeitos locais quanto os não locais na evolução do tensor tensão de Reynolds. Entretanto, tal aproximação requereu a solução de seis equações adicionais de transporte para os componentes individuais do tensor tensão de Reynolds, tornando-se computacionalmente inviável, à época, e por algumas das décadas seguintes. Nos anos de 1970, com a ampliação da capacidade dos computadores de alta velocidade (na época), um novo impulso no desenvolvimento e implementação de modelos aproximados de duas equações foi reiniciado, com os trabalhos de Daly and Harbow (1970), e Donaldson (1972). Numa importante publicação, Launder, Reece and Rodi (1975) desenvolveram um novo modelo aproximado de duas equações que ampliou significativamente os trabalhos pioneiros de Rotta (1951).

Modelos mais sistemáticos para a correlação pressão-velocidade e termos de transporte turbulento foram derivados; uma equação de transporte para a taxa de dissipação turbulenta foi modelada e também resolvida juntamente com este modelo dos tensores de Reynolds. Entretanto, o mais importante foi que Launder, Reece and Rodi (1975) mostraram como modelos aproximados de duas equações seriam refinados e aplicados à solução de escoamentos turbulentos práticos. Quando o modelo destes autores é contraído e suplementado com uma representação da viscosidade turbulenta para o tensor de Reynolds, um modelo de duas equações (referido como modelos $k-\epsilon$) é obtido, o qual é quase idêntico àquele derivado por Hanjalic and Launder (1972) poucos anos antes. Devido ao esforço computacional substancialmente baixo requerido, o modelo $k-\epsilon$ é ainda hoje um dos modelos de turbulência mais comumente usados para a solução de problemas práticos de engenharia.

4.5- Descrição dos Modelos de Turbulência Estudados

4.5.1- O Modelo k-ε Padrão

O modelo k-ε padrão é um modelo de viscosidade turbulenta no qual se assume que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta, $\mu^{(t)}$ (idealização conhecida como hipótese de Boussinesq). Modelos deste tipo são baseados numa viscosidade turbulenta.

A característica destes tipos de modelos é que duas equações de transporte modeladas, separadamente, são resolvidas para o comprimento turbulento e a escala de tempo (ou para quaisquer duas combinações linearmente independentes delas).

O tensor de Reynolds é expresso da seguinte forma:

$$T^{(t)}_k = -2\mu_k^{(t)} \bar{D}_k + \frac{2}{3}k_k I \quad (4.11)$$

na qual k_k é a energia cinética turbulenta da fase k, I é o tensor identidade, D_k é a taxa de deformação e μ_k é a viscosidade turbulenta da fase k, dada por:

$$\mu_k = \rho_k c_k q_k l_k \quad (4.12)$$

Com q_k a escala de velocidade, l_k é o comprimento de escala espacial e c_k é uma constante empírica.

A energia cinética turbulenta para a fase k, relaciona-se diretamente com a escala de velocidade q_k (Fergizer, (1996)):

$$k_k = \frac{q_k^2}{2} \quad (4.13)$$

Uma equação para a energia cinética turbulenta pode ser derivada a partir das equações de Navier-Stokes, por subtração da equação média temporal da equação

instantânea para obter uma equação para a flutuação da velocidade. Carvalho (1993) apresenta os detalhes matemáticos do procedimento descrito para a obtenção da equação para k_k . Assim,

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho_k f_k k_k} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\overline{\rho_k f_k v_k k_k} \right) = + \overline{f_k} \nabla \cdot \left(\frac{\mu^{ef}_k}{\sigma_k} \nabla k \right) + \overline{f_k} \left[G_k - \overline{\rho_k} \varepsilon_k \right] \quad (4.14)$$

Onde:

- ◆ Viscosidade efetiva da fase k,

$$\mu^{ef}_k = \mu^{(l)}_k + \mu^{(t)}_k; \quad (4.15)$$

com $\mu^{(l)}$ representando a viscosidade dinâmica da fase k

- ◆ Geração de energia cinética turbulenta no interior da fase k,

$$G_k = -T^{(l)}_k : \nabla \overline{v_k}; \quad (4.16)$$

- ◆ Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase k,

$$\varepsilon_k = \frac{c_k q_k^3}{l_k}; \quad (4.17)$$

A partir das equações (4.12), (4.13) e (4.17) chega-se a uma expressão para a viscosidade turbulenta da fase k:

$$\mu^{(t)}_k = C_\mu \overline{\rho_k} \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (4.18)$$

Na qual,

$$C_\mu = 4c_k^2; \quad (4.19)$$

é uma constante empírica do modelo.

Para completar o modelo, é necessário apresentar uma equação diferencial para ε_k :

$$\frac{\partial \left(\overline{\rho_k f_k \varepsilon_k} \right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\overline{\rho_k f_k v_k \varepsilon_k} \right) = + \overline{f_k} \nabla \cdot \left(\frac{\mu^{ef}_k}{\sigma^\varepsilon} \nabla \varepsilon_k \right) + \overline{f_k} \left[C_1 G_k - \overline{C_2 \rho_k \varepsilon_k} \right] \frac{\varepsilon_k}{k_k} \quad (4.20)$$

As constantes assumem valores aproximados de (fonte: programa ANSYS® CFX®- 5TM);

$$C_\mu = 0,09; \quad \sigma^k = 1,00; \quad \sigma^\varepsilon = 1,30; \quad C_1=1,44; \quad C_2=1,92$$

As quais foram obtidas, em sua maioria, por comparações das predições dos modelos com os resultados de turbulência isotrópica física.

Uma das maiores deficiências do modelo k-ε padrão encontra-se em seu uso como um modelo de viscosidade turbulenta para o tensor tensão de Reynolds. Modelos de viscosidade turbulenta têm dois grandes problemas associados a eles: i) Eles são muito pobres em dissipação e conseqüentemente não podem computar os efeitos de relaxação para tensores de Reynolds; e ii) Eles são abstraídos na presença de forças rotacionais (por exemplo, eles falham em distinguir entre os casos fisicamente distintos de cisalhamento plano, forças planas e cisalhamento rotacional). Com o intuito de sanar tais deficiências, direcionou-se um grande esforço em pesquisas rumo ao desenvolvimento de generalizações não-lineares ou anisotrópicas de modelos de viscosidade turbulenta.

4.5.2- O Modelo RSM (“Reynolds Stress Model”)

A fonte desta consulta foi a biblioteca do software CFX, (ANSYS® CFX® - 5™).

Uma das maiores limitações do modelo k-ε padrão é que a viscosidade turbulenta é isotrópica. Isto implica que as escalas de velocidade e comprimento são as mesmas em todas as direções. Em escoamentos complexos, tais como escoamentos altamente turbulentos, estas escalas podem variar significativamente com a direção. Para tais escoamentos o modelo k-ε é inadequado e pode produzir resultados fisicamente incorretos. O modelo RSM, o qual computa os tensores individuais de Reynolds, fornece uma melhor alternativa em tais casos.

O modelo RSM é baseado em equações de transporte para todos os componentes do tensor tensão de Reynolds e a taxa de dissipação. Eles são recomendados para escoamentos fortemente anisotrópicos. Este modelo não usa a hipótese de viscosidade turbulenta. Nele, resolve-se uma equação para o transporte dos tensores de Reynolds no fluido para cada um dos componentes individuais do tensor.

Equações diferenciais foram desenvolvidas para cada componente dos tensores de Reynolds e sua solução fornece cada um dos componentes do tensor, permitindo a anisotropia nos termos do tensor turbulento, conforme mostrado nas equações a seguir:

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (U_k \overline{\rho u_i u_j}) = P_{ij} + \phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{2}{3} c_s \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_k} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \rho \quad (4.21)$$

Aqui, ϕ_{ij} é a correlação de força de pressão, k é a energia cinética turbulenta, ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, δ_{ij} representa a matriz identidade (função Delta de Kronecker) e P é o termo de produção, dado por:

$$P = -\rho \left(\overline{u \cdot u} (\nabla U)^T + (\nabla U) \overline{u \cdot u} \right) \quad (4.22)$$

Uma vez que o termo de dissipação turbulenta aparece nas equações dos tensores individuais, é preciso apresentar a equação para ε :

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\sigma_{\varepsilon RS}} \left(\mu + \rho C_{\mu RS} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] \quad (4.23)$$

Para o modelo RSM, tem-se os seguintes valores para as constantes (fonte: programa ANSYS® CFX®- 5™):

$$c_s = 0,22; \quad c_{\varepsilon 1} = 1,45; \quad c_{\varepsilon 2} = 1,9; \quad C_{\mu RS} = 0,1152.$$

Os valores das constantes acima variam de acordo com o tipo de modelo RSM desenvolvido. Os citados nesta tese são baseados no modelo RSM desenvolvido por Laufer, Reeci e Rodi (1975), o que fornece a denominação de modelo RSM –LRR.

4.5.3 – O Modelo LES

A fonte desta consulta foi a biblioteca do software ANSYS® CFX®- 5™.

A simulação de grandes turbilhões (“Large-Eddies Simulation” – LES) teve importantes aplicações geofísicas em estudos climáticos e outras pesquisas atmosféricas. Do mesmo modo, LES mostrou uma nova luz na física de determinados escoamentos turbulentos básicos - os quais incluem escoamentos cisalhantes homogêneos e escoamentos em canais e dutos - a números de Reynolds elevados que não são acessíveis a simulação direta.

A abordagem convencional para a predição de escoamentos turbulentos baseia-se no uso das Equações de Navier-Stokes Médias Temporais ou de Reynolds (RANS – “Reynolds Averaged Navier-Stokes”), as quais são usadas na resolução de médias temporais. Entretanto, há algumas situações nas quais a abordagem não é adequada, e como uma alternativa tem-se a abordagem da simulação LES ou também denominado modelo DNS (“Direct Numerical Simulation”). Com este método, equações em função do tempo são resolvidas para escoamentos turbulentos fazendo uso de:

i) de ausência de aproximações com solução de todas as escalas relevantes (caso DNS) ou

ii) as equações são separadas de forma a remover diversas escalas de tempo e espaço (caso LES).

Estas abordagens requerem boas malhas e pequenos passos de tempo na simulação, particularmente para escoamentos na parede. Entretanto, elas podem fornecer detalhes na estrutura dos escoamentos turbulentos tais como flutuações de pressão e pequenos tensores, os quais podem não ser obtidos ao se adotar a formulação RANS.

As equações de Navier-Stokes não separadas são representadas por:

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4.24)$$

O modelo LES separa as equações do movimento e decompõe as variáveis do escoamento em duas partes: uma correspondente a grande escala (resolvida) e a outra a pequena escala (não resolvida). Qualquer variável de escoamento f pode ser escrita da seguinte forma:

$$f = \bar{f} + f' \quad (4.25)$$

Onde \bar{f} , a parte referente a grande escala, é definida através de uma média volumétrica, tal como:

$$\bar{f}(x_i, t) = \int_{Vol} G(x_i - x_i') f(x_i', t) dx_i' \quad (4.26)$$

Onde $G(x_i - x_i')$ é a função filtro (denominado filtro Gaussiano).

Após o cálculo da média volumétrica, e desprezando as flutuações de densidade, as equações de Navier-Stokes separadas tornam-se:

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u_i u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (4.27)$$

O termo de transporte não linear na equação separada pode ser desenvolvido como:

$$\overline{u_i u_j} = \overline{(\overline{U_i} + u_i')(\overline{U_j} + u_j')} = \underbrace{\overline{U_i U_j}}_{(1)} + \underbrace{\overline{U_i u_j'}}_{(2)} + \underbrace{\overline{U_j u_i'}}_{(3)} + \underbrace{\overline{u_i' u_j'}}_{(4)} \quad (4.28)$$

Na média temporal, os termos 2 e 3 desaparecem, mas este fato não é observado quando se trabalha com a média volumétrica.

Introduzindo tensores de escala de sub-malha (“Sub-Grid Scale” - SGS), τ_{ij} como:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{U_i U_j} \quad (4.29)$$

Pode-se reescrever as equações separadas de Navier-Stokes da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \tau_{ij} + \rho \overline{U_i U_j})}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial x_j \partial x_j} & \text{ou} \\ \frac{\partial(\rho \overline{U_i})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{U_i U_j})}{\partial x_j} &= -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial(\rho \tau_{ij})}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (4.30)$$

com

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \overline{u_i u_j} - \overline{U_i U_j} \\ &= \overline{U_i U_j} + \overline{U_i u_j'} + \overline{U_j u_i'} + \overline{u_i' u_j'} - \overline{U_i U_j} \\ &= L_{ij} + C_{ij} + R_{ij} \\ L_{ij} &= \overline{U_i U_j} - \overline{U_i U_j} = \textit{Leonard Stresses} \\ C_{ij} &= \overline{U_i u_j'} + \overline{U_j u_i'} = \textit{Cross Terms} \\ R_{ij} &= \overline{u_i' u_j'} = \textit{SGS Reynolds Stresses} \end{aligned} \quad (4.31)$$

4.5.3.1. Modelo de Smagorinsky

O modelo Smagorinsky pode ser visto como uma combinação das considerações da média de Reynolds dada por $L_{ij} + C_{ij} = 0$ com um comprimento de mistura baseado no modelo de viscosidade turbulenta para o tensor SGS de Reynolds (R_{ij}). Então, assume-se que os tensores SGS são proporcionais ao módulo da taxa do tensor tensão, $|\bar{S}|$, do escoamento separado de larga escala:

$$\tau_{ij} = -\frac{1}{3}\tau_{kk} = -2 \cdot v_{SGS} \cdot \bar{S}_{ij} = v_{SGS} \cdot \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.32)$$

Para fechar a equação, necessita-se de um modelo para a viscosidade SGS, v_{SGS} . Baseado em análises dimensionais, a viscosidade SGS pode ser escrita da seguinte forma:

$$v_{SGS} \propto l q_{SGS} \quad (4.33)$$

Onde l é a escala de comprimento do movimento não resolvido (geralmente o tamanho da malha, dado por $\Delta = (\text{vol})^{1/3}$) e q_{SGS} é a velocidade do movimento não resolvido.

No modelo Smagorinsky, baseado em uma analogia ao modelo do comprimento de mistura de Prandtl, a escala de velocidade está relacionada aos gradientes da velocidade separada:

$$q_{SGS} = \Delta |\bar{S}| \quad (4.34)$$

onde,

$$|\bar{S}| = \left(2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij} \right)^{1/2} \quad (4.35)$$

Com isto chega-se ao modelo de Smagorinsky para a viscosidade SGS:

$$v_{SGS} = (C_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (4.36)$$

Com C_s denominada a constante de Smagorinsky. O valor desta constante para turbulência isotrópica para a faixa de espectro inicial dada por:

$$E(k) = C_k \varepsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (4.37)$$

É descrita pela expressão:

$$C_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2}{3C_k} \right)^{3/4} = 0,18 \quad (4.38)$$

Para efeitos práticos, o valor de C_s é substituído dependendo do tipo de escoamento e da resolução da malha. Seu valor varia entre um mínimo de 0,065 (escoamento em canais) até um máximo de 0,25. O valor mais freqüentemente usado é 0,1.

4.5.4 – O Modelo DES

A fonte desta consulta foi a biblioteca do software ANSYS® CFX®- 5™.

Numa tentativa de melhorar a capacidade de predição de modelos de turbulência em regiões altamente separadas, Sparlate (1997) propôs uma abordagem híbrida, que reúne características inerentes às formulações clássicas do modelo RANS (“Reynolds Average Navier-Stokes”) com elementos do modelo LES anteriormente descrito. Este conceito foi classificado de “Detached Eddy Simulation” (DES) e se baseia na idéia de abranger a camada limite através de um modelo RANS e de substituir este modelo por um modelo LES nas regiões separadas. Teoricamente, o modelo DES prediria a linha de separação das camadas a partir do modelo RANS, mas capturaria as dinâmicas transientes das camadas superficiais separadas através da solução das estruturas turbulentas desenvolvidas. Em comparação ao modelo LES clássico, o modelo DES salva ordens de magnitude no esforço computacional para escoamentos a elevados números de Reynolds, devido ao custo moderado do modelo RANS na região da camada limite, enquanto oferece ainda as vantagens advindas do modelo LES nas regiões separadas.

A idéia por trás do modelo DES de Strelets (2001) é a substituição do modelo RANS a um modelo LES na região onde a escala de turbulência predita pelo modelo

RANS (aqui chamada l_t) é maior do que o espaçamento local da malha. Neste caso, a escala de comprimento usada na computação da taxa de dissipação na equação para a energia cinética turbulenta é substituída pelo espaçamento local da malha (aqui chamado Δ).

$$\varepsilon = \beta^* k \omega \xrightarrow{\frac{l_t^3}{l_t}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{C_{DES} \Delta} \quad \text{para} \quad C_{DES} \Delta < l_t \quad \Delta = \max(\Delta_i); \quad l_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega} \quad (4.44)$$

A razão prática para a escolha da escala de comprimento máxima na formulação DES é que o modelo retornaria à formulação RANS em camadas limite anexadas. O comprimento máximo das bordas é, conseqüentemente, a estimativa mais segura para garantir esta demanda.

A modificação DES de Strelets (2001) pode ser formulada como um produto do termo destrutivo na equação k- ε :

$$\varepsilon = \beta^* k \omega \rightarrow \beta^* k \omega \cdot F_{DES} \quad \text{com} \quad F_{DES} = \max\left(\frac{l_t}{C_{DES} \Delta}, 1\right) \quad (4.45)$$

com C_{DES} igual a 0,61. A formulação numérica também varia entre os esquemas upwind e diferença central nas regiões RANS e DES, respectivamente.

CAPÍTULO 05

MÉTODOS NUMÉRICOS E PACOTES COMPUTACIONAIS

“Quando o homem compreende sua realidade, pode levantar hipóteses sobre o desafio dessa realidade e procurar soluções. Assim, pode transformá-la e seu trabalho pode criar um mundo próprio, seu eu e suas circunstâncias.”

(Paulo Freire)

5.1- Apresentação

Neste capítulo é feita uma apresentação sobre os métodos numéricos utilizados para a solução das equações que envolvem os modelos apresentados no capítulo anterior. É apresentada uma abordagem sucinta das particularidades dos métodos que efetivamente foram utilizados no desenvolvimento do trabalho. O enfoque é concentrado na obtenção das equações de discretização, nos esquemas de interpolação, nas estratégias aplicadas para se garantir a estabilidade e a convergência das soluções numéricas, ao acoplamento pressão-velocidade e à malha numérica utilizada para a solução dos modelos.

A propósito da solução dos problemas propostos, são apresentados os pacotes computacionais utilizados para a realização dos experimentos numéricos e simulações dos estudos de caso que compõem o escopo deste trabalho, abordando os softwares FLUENT e CFX, especializados na solução de problemas em fluidodinâmica computacional (CFD). Na esteira de cada pacote, também são descritas as ferramentas que os mesmos utilizam para a construção de geometrias e geração de malhas numéricas necessárias à realização das simulações. No final do capítulo, são reapresentados os estudos de casos utilizados neste trabalho, suas características, a geometria e as malhas numéricas geradas.

O uso de técnicas numéricas para a solução de complexos problemas da engenharia e da física é, hoje, uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função desta disponibilidade

computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas, tem recebido especial atenção dos analistas numéricos (Maliska, 1995).

Os métodos analíticos e os métodos numéricos formam a classe dos métodos teóricos, pois ambos objetivam resolver equações diferenciais. A experimentação numérica praticamente não apresenta restrições, podendo resolver problemas com complicadas condições de contorno, definidos em geometrias arbitrárias e apresentando resultados com bastante rapidez. Esta ferramenta numérica é adequada e confiável quando se está de posse de um método numérico que resolva corretamente as equações diferenciais, e de um modelo matemático que, sabidamente, represente com fidelidade o fenômeno físico.

5.2- O Método dos Volumes Finitos

Até o início da década de 70, no século passado, tinha-se o método das diferenças finitas (MDF) com grande experiência na área de fluidos, mas sem habilidades para tratar geometrias complexas; e o método dos elementos finitos (MEF), hábil no tratamento da geometria, mas sem ferramentas para tratar os termos convectivos presentes nas equações do movimento (Maliska, 1995). Mesmo suplantando a questão do princípio variacional, através do uso do método de Galerkin e outras variantes, o MEF não obteve sucesso imediato em problemas de fluidos, uma vez que o método de Galerkin (que é equivalente ao uso de diferenças centrais no MDF) é adequado apenas para problemas puramente difusivos. Este e outros problemas similares motivaram pesquisas para o aparecimento do método dos volumes finitos (MVF), no qual as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação da propriedade envolvida (massa, quantidade de movimento, entalpia, etc.) no volume elementar de controle.

Segundo Maliska (1995), a preferência pelo MVF para problemas de escoamento de fluidos é justificada pelo fato deste método, ao criar suas equações aproximadas, estar realizando um balanço da propriedade em nível de volumes elementares. Uma vez que no MVF os balanços de conservação devem ser satisfeitos em nível de volumes elementares, para qualquer tamanho de malha, todos os princípios de conservação podem ser checados em uma malha bastante grosseira.

Uma gama considerável de material bibliográfico a respeito da utilização do MVF para a solução de problemas de fluidodinâmica computacional está disponível na literatura científica. Exemplos incluem trabalhos de Patankar and Spalding (1972), Patankar (1980), Patankar (1981) e Maliska (1995).

No método dos volumes finitos, o domínio de cálculo é subdividido em volumes de controle que contêm os pontos da malha numérica (denominados de nós). Estes volumes não são sobrepostos, ou seja, cada volume de controle representa apenas um e somente um nó. Todas as variáveis são definidas no centro dos volumes de controle (à exceção de fronteiras), os quais preenchem os domínios físicos a serem considerados. Cada equação é integrada sobre cada volume de controle para obter uma equação discreta, a qual conecta as variáveis no centro do volume de controle com sua vizinhança. Dessa maneira, o princípio de conservação é satisfeito na sua forma integral para cada volume (Moreira, 2002).

As equações a serem resolvidas têm a mesma forma geral apresentada pela equação (5.1).

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \phi) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) = S \quad (5.1)$$

Onde:

- ◆ ρ = massa específica; ϕ = propriedade; Γ = termo difusivo e S = termo fonte;
- ◆ O termo temporal (o primeiro termo do lado esquerdo da equação (5.1)) tem a finalidade de avançar a solução do problema no espaço de tempo;
- ◆ O segundo termo representa a parte convectiva da variável ϕ e são os termos mais difíceis de tratar, em virtude de sua natureza não-linear;
- ◆ O terceiro representa o balanço dos fluxos difusivos;
- ◆ O termo do lado direito desta equação é o termo fonte. É responsável por acomodar todos os termos que não se encaixam na forma apresentada pela equação (5.1).

Integrando-se a equação (5.1) sobre os volumes de controle, obtém-se:

$$\underbrace{\int \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} dV}_{\text{Termo transiente}} + \underbrace{\int \rho \phi \vec{U} \cdot \vec{n} dA}_{\text{Termo convectivo}} - \underbrace{\int \Gamma \nabla \phi \cdot \vec{n} dA}_{\text{Termo difusivo}} = \underbrace{\int S dV}_{\text{Termo fonte}} \quad (5.2)$$

Cada termo proveniente da integração da equação (5.1) é discretizado no espaço usando-se uma diferenciação central de segunda ordem e os coeficientes convectivos obtidos usando a fórmula de interpolação “Rhie-Chow”.

5.2.1- Equação Geral de Discretização

A equação geral de discretização é, neste caso, a equação discreta e aproximada resultante da integração formal do modelo EEMB, descrito no capítulo 04.

Considere o volume de controle genérico apresentado na Figura 5.1, onde P é um ponto da malha cuja posição coordenada é (r, z) e N, S, W e E seus vizinhos ortogonais nas posições norte $(r, z + (\Delta z)_n)$, sul $(r, z - (\Delta z)_s)$, oeste $(r - (\Delta r)_w, z)$ leste $(r + (\Delta r)_e, z)$, respectivamente. As faces do volume de controle nas respectivas direções são denotadas por n, s, w e e . O volume de controle tem um volume $\Delta r \cdot \Delta z \cdot 1$, pois o modelo avaliado nesta fase tem formulação bidimensional, considerando então variação unitária em θ (Meier, 1998).

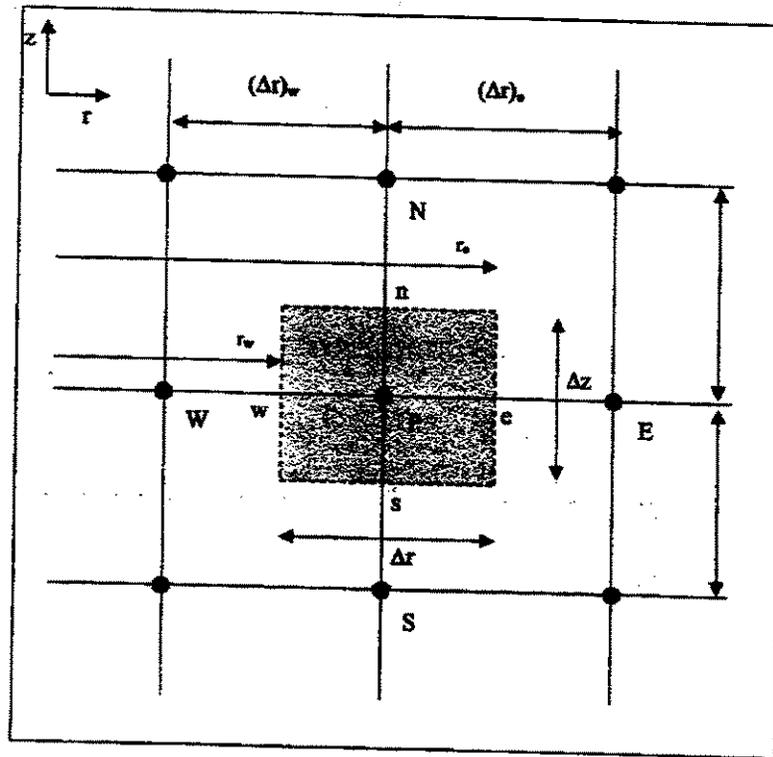


Figura 5.1: Representação genérica de um volume de Controle (Meier, 1998).

Uma vez que o modelo avaliado é baseado nos trabalhos de Meier (1998), a dedução da equação geral de discretização a ser apresentada a seguir foi extraída do trabalho deste autor.

Obtém-se a equação geral de discretização por integração da equação de conservação genérica para a propriedade ϕ_k sobre o volume elementar de controle, ou seja:

$$\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^{n_e} \int_r \frac{\partial(f_k \phi_k)}{\partial\tau} dr dz d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^{n_e} C_k(\phi_k) dr dz d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^{n_e} D_k(\phi_k) dr dz d\tau + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^{n_e} S_{\phi_k} dr dz d\tau \quad (5.3)$$

Ou ainda, numa forma mais geral: (I) + (II) = (III) + (IV)

Integrando individualmente os termos da equação (5.3), obtém-se:

◆ Termo de Acúmulo da Propriedade ϕ_k :

$$(I) = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_{s_w}^{n_e} \int_r \frac{\partial(f_k \phi_k)}{\partial\tau} dr dz d\tau = \int_{s_w}^{n_e} \int_r [(f_k \phi_k)^{\tau+\Delta\tau} - (f_k \phi_k)^{\tau}] r dr dz \quad (5.4)$$

Numericamente, a fração volumétrica da fase k e a propriedade genérica ϕ_k são constantes no volume de controle e cujos valores correspondem ao valor dela no ponto P (Figura 5.1), tem-se:

$$(I) = \left[(f_k \phi_k)_P^{\tau+\Delta\tau} - (f_k \phi_k)_P^{\tau} \right] \Delta V \quad (5.5)$$

onde

$$\Delta V = \left(\frac{r_e^2 - r_w^2}{2} \right) \Delta z \quad (5.6)$$

◆ Termo de Convecção da Propriedade ϕ_k :

$$(II) = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^e \int_w^n C_k(\phi_k) dr dz d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^e \int_w^n \left[\frac{\partial}{\partial r} (r f_k u_k \phi_k) + r L_d \frac{\partial}{\partial Z} (f_k w_k \phi_k) \right] dr dz d\tau \quad (5.7)$$

Utilizando-se uma formulação implícita no tempo e fazendo a integração espacial, a equação (5.7) pode ser reescrita como segue:

$$(II) = \left\{ (f_k u_k \phi_k)_e^{\tau+\Delta\tau} A_e - (f_k u_k \phi_k)_w^{\tau+\Delta\tau} A_w + L_d \left[(f_k w_k \phi_k)_n^{\tau+\Delta\tau} A_n - (f_k w_k \phi_k)_s^{\tau+\Delta\tau} A_s \right] \right\} \Delta\tau \quad (5.8)$$

Cujas áreas nas faces são definidas como:

$$A_e = r_e \Delta Z \quad , \quad A_w = r_w \Delta Z \quad , \quad A_n = A_s = \frac{r_e^2 - r_w^2}{2} \quad (5.9)$$

◆ Termo de Difusão da Propriedade ϕ_k :

$$(III) = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^e \int_w^n D_k(\phi_k) dr dz d\tau = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^e \int_w^n \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right) + r L_d \frac{\partial}{\partial Z} \left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial Z} \right) \right] dr dz d\tau \quad (5.10)$$

Fazendo uso das mesmas aproximações anteriores, a equação (5.10) torna-se:

$$(III) \approx \left\{ \left(f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right)_e^{\tau+\Delta\tau} A_e - \left(f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right)_w^{\tau+\Delta\tau} + \right. \\ \left. + L_d \left[\left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial Z} \right)_n^{\tau+\Delta\tau} A_n - \left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial Z} \right)_s^{\tau+\Delta\tau} A_s \right] \right\} \Delta\tau \quad (5.11)$$

◆ Termos Fonte:

$$(IV) = \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \int_s^e \int_r^n S_{\phi_k} dr dz d\tau \quad (5.12)$$

Pode-se adotar a aproximação numérica de que o termo fonte é constante no volume de controle e com o valor correspondente ao do ponto P da malha. Assim, a equação (5.12) reduz-se a:

$$(IV) = [S_{\phi_k}]_P^{\tau+\Delta\tau} \quad (5.13)$$

Finalmente, reescrevendo a equação (5.1) com as expressões obtidas para os termos (I), (II), (III) e (IV), obtém-se a seguinte equação geral de discretização:

$$\begin{aligned} & \left[(f_k \phi_k)_P^{\tau+\Delta\tau} - (f_k \phi_k)_P^{\tau} \right] \Delta V + \left\{ (f_k u_k \phi_k)_e^{\tau+\Delta\tau} A_e - (f_k u_k \phi_k)_w^{\tau+\Delta\tau} A_w + \right. \\ & \left. + L_d [(f_k w_k \phi_k)_n^{\tau+\Delta\tau} A_n - (f_k w_k \phi_k)_s^{\tau+\Delta\tau} A_s] \right\} \Delta\tau - \\ & - \left\{ \left(f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right)_e^{\tau+\Delta\tau} A_e - \left(f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right)_w^{\tau+\Delta\tau} + \right. \\ & \left. + L_d \left[\left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial z} \right)_n^{\tau+\Delta\tau} A_n - \left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial z} \right)_s^{\tau+\Delta\tau} A_s \right] \right\} \Delta\tau - [S_{\phi_k}]_P^{\tau+\Delta\tau} = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

Por conveniência de apresentação, a partir daqui o superscrito $(\tau + \Delta\tau)$ será omitido, simbolizando o tempo atual, e o superscrito (τ) será trocado por $(^0)$ simbolizando o tempo anterior. Desta forma, a última equação fica na forma:

$$\begin{aligned} & \left[(f_k \phi_k)_P - (f_k \phi_k)_P^0 \right] \frac{\Delta V}{\Delta\tau} + \left\{ (f_k u_k \phi_k)_e A_e - (f_k u_k \phi_k)_w A_w + \right. \\ & \left. + L_d [(f_k w_k \phi_k)_n A_n - (f_k w_k \phi_k)_s A_s] \right\} - \\ & - \left\{ \left(f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right)_e A_e - \left(f_k (\Gamma_k)_{r,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial r} \right)_w + \right. \\ & \left. + L_d \left[\left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial z} \right)_n A_n - \left(f_k (\Gamma_k)_{z,j}^{\phi_k} \frac{\partial \phi_k}{\partial z} \right)_s A_s \right] \right\} - [S_{\phi_k}]_P = 0 \end{aligned} \quad (5.15)$$

Agora, faz-se necessária à definição de interpolações para os termos convectivos e difusivos nas faces do volume de controle (para facilitar a representação da equação geral de discretização, omitiremos a partir daqui os subscritos k e j).

Uma definição genérica que não determina o esquema específico de interpolação foi apresentada por Maliska (1995).

- Termos Convectivos:

$$\begin{aligned}\phi_n &= \left(\frac{1}{2} + \alpha_n\right)\phi_P + \left(\frac{1}{2} - \alpha_n\right)\phi_N, \phi_s = \left(\frac{1}{2} + \alpha_s\right)\phi_S + \left(\frac{1}{2} - \alpha_s\right)\phi_P, \\ \phi_e &= \left(\frac{1}{2} + \alpha_e\right)\phi_P + \left(\frac{1}{2} - \alpha_e\right)\phi_E, \phi_w = \left(\frac{1}{2} + \alpha_w\right)\phi_W + \left(\frac{1}{2} - \alpha_w\right)\phi_P\end{aligned}\quad (5.16)$$

- Termos Difusivos / Dispersivos:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_n &= \beta_e \left(\frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta z_n}\right), \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)_s = \beta_s \left(\frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta z_s}\right), \\ \left(\frac{\partial\phi}{\partial r}\right)_e &= \beta_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta r_e}\right), \left(\frac{\partial\phi}{\partial r}\right)_w = \beta_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta r_w}\right)\end{aligned}\quad (5.17)$$

Nas equações (5.16) e (5.17), os coeficientes α e β são definidos pela escolha apropriada de um esquema de interpolação, que será discutido na seção a seguir.

Outra aproximação numérica necessária para a obtenção da equação geral de discretização é a linearização do termo fonte:

$$(S)_P \Delta V = S_c + S_p \phi_P \quad (5.18)$$

Onde S_c representa o coeficiente linear e S_p o coeficiente angular da linearização.

E assim, substituindo-se os esquemas genéricos de interpolação para os termos de convecção e difusão/dispersão (equações (5.16) e (5.17)) e a linearização do termo fonte

(equação (5.18)) na equação (5.15), e usando o artifício de colocar a variável ϕ_p em evidência, tem-se:

$$\begin{aligned}
& \left[f_p \frac{\Delta V}{\Delta \tau} + (u)_e \left(\frac{1}{2} + \alpha_e \right) f_e A_e - (u)_w \left(\frac{1}{2} - \alpha_w \right) f_w A_w + L_d(w)_n \left(\frac{1}{2} + \alpha_n \right) f_n A_n - \right. \\
& \left. - L_d(w)_s \left(\frac{1}{2} - \alpha_s \right) f_s A_s + \frac{(\Gamma_r)_e}{\Delta r_e} \beta_e f_e A_e + \frac{(\Gamma_r)_w}{\Delta r_w} \beta_w f_w A_w + L_d \frac{(\Gamma_z)_n}{\Delta z_n} \beta_n f_n A_n + \phi_p = \right. \\
& \left. + L_d \frac{(\Gamma_z)_s}{\Delta z_s} \beta_s f_s A_s - Sp \right] \\
& = \left[L_d \frac{(\Gamma_z)_n}{\Delta z_n} \beta_n f_n A_n - L_d(w)_n \left(\frac{1}{2} - \alpha_n \right) f_n A_n \right] \phi_N + \left[L_d \frac{(\Gamma_z)_s}{\Delta z_s} \beta_s f_s A_s + L_d(w)_s \left(\frac{1}{2} + \alpha_s \right) f_s A_s \right] \phi_S + \\
& + \left[\frac{(\Gamma_r)_e}{\Delta r_e} \beta_e f_e A_e - (u)_e \left(\frac{1}{2} - \alpha_e \right) f_e A_e \right] \phi_E + \left[\frac{(\Gamma_r)_w}{\Delta r_w} \beta_w f_w A_w + (u)_w \left(\frac{1}{2} + \alpha_w \right) f_w A_w \right] \phi_W + \\
& + f_p^0 \phi_p^0 \frac{\Delta V}{\Delta \tau} + Sc
\end{aligned} \tag{5.19}$$

A equação (5.19) pode ser escrita na forma da equação de discretização geral, como segue:

$$a_p \phi_p = a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \tag{5.20}$$

Na qual os coeficientes são definidos por:

$$\begin{aligned}
 a_N &= L_d \left[\frac{(\Gamma_z)_n}{\Delta x_n} \beta_n f_n A_n - (w)_n \left(\frac{1}{2} - \alpha_n \right) \right] f_n A_n \\
 a_S &= L_d \left[\frac{(\Gamma_z)_s}{\Delta x_s} \beta_s f_s A_s + (w)_s \left(\frac{1}{2} + \alpha_s \right) \right] f_s A_s \\
 a_E &= \left[\frac{(\Gamma_r)_e}{\Delta r_e} \beta_e - (u)_e \left(\frac{1}{2} - \alpha_e \right) \right] f_e A_e \\
 a_W &= \left[\frac{(\Gamma_r)_w}{\Delta r_w} \beta_w + (u)_w \left(\frac{1}{2} + \alpha_w \right) \right] f_w A_w \\
 a_p &= a_N + a_S + a_E + a_W + f_p \frac{\Delta V}{\Delta \tau} - Sp + L_d \left[(w)_n f_n A_n - (w)_s f_s A_s \right] + (u)_e f_e A_e - (u)_w f_w A_w \\
 b &= Sc + f_p^0 \phi_p^0 \frac{\Delta V}{\Delta \tau}
 \end{aligned}
 \tag{5.21}$$

A equação (5.20) pode ser aplicada para cada variável ϕ_k do modelo para formar um sistema algébrico de equações que podem ser resolvidas por um procedimento típico linha por linha com TDMA – “TriDiagonal Matrix Algoritm” (Patankar, (1980)). As não linearidades e os acoplamentos entre as variáveis são introduzidos gradativamente num processo iterativo de solução sucessiva de sistemas algébricos lineares.

5.2.2- Os Esquemas de Interpolação

A literatura apresenta uma considerável quantidade de informações sobre os esquemas tradicionais e os esquemas numéricos de alta ordem para a interpolação (usados para definir as variáveis nas faces dos volumes de controle). Exemplos mais citados incluem Patankar (1980) e Maliska (1995).

O tratamento dos termos convectivos determina a acurácia das soluções dos modelos das equações. Estes termos são difíceis de tratar porque sistemas com muita acurácia tendem a ser menos robustos ou mais vagarosos. Por isso, há alguns métodos que podem ser escolhidos para fazer a sua discretização, os mais usados são:

- Esquema UPWIND

Esquema de interpolação de primeira ordem onde o valor da função na interface ($\phi_{interface}$) é igual ao valor da função no volume a montante ($\phi_{nó\ a\ montante}$). Neste caso tem-se:

$$\begin{aligned}\beta &= 1; \\ \alpha &= \frac{1}{2}, \text{ se } v \geq 0; \\ \alpha &= -\frac{1}{2}, \text{ se } v < 0.\end{aligned}\tag{5.22}$$

Os parâmetros α e β são constituintes dos coeficientes da equação geral de discretização (Equação 5.21). As relações para α e β , estabelecidas no conceito do esquema Upwind de diferenciação (representadas na Equação 5.22), estão relatadas na Equação 5.23), e fazem referência ao número adimensional de Peclet (notação : Pe). Este número é baseado na distância linear entre dois nós no volume elementar de integração de uma malha numérica, equivalente à distância representada por Δr na Figura 5.1 desta tese. A definição do número de Peclet é extraída das simplificações geradas no processo de obtenção da equação geral de discretização, sendo definido por:

$$Pe = \frac{\rho \cdot u \Delta r}{\Gamma} = \frac{m \cdot \Delta r}{\Gamma}, \text{ com } m \text{ representando o fluxo mássico na direção genérica } r$$

- Esquema UPWIND Ponderado (WUDS)–“ Weighted Upstream Differencing Scheme”.

Neste caso, tem-se

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{Pe^2}{10 + 2 Pe^2}; \\ \beta &= \frac{(1 + 0,005 Pe^2)}{(1 + 0,05 Pe^2)}\end{aligned}\tag{5.23}$$

- Esquema das Diferenças Centrais (CDS)

Esquema de segunda ordem raramente é usado por não ser robusto e requerer freqüentemente muitos fatores de sub-relaxação ou por gerar soluções não-físicas. O valor da função na interface será dado por:

$$\begin{aligned} \beta &= 1; \\ \alpha &= 0; \end{aligned} \tag{5.24}$$

- Esquema QUICK

A função de interpolação QUICK (“Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics”) tem como premissa aumentar a ordem de aproximação da função de interpolação, utilizando um polinômio de maior ordem. Tomemos como exemplo a notação a seguir :

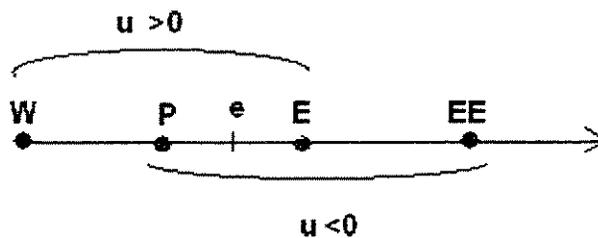


Figura 5.1*: Pontos usados no esquema Quick (Fonte: Maliska, 1995).

Se o interesse for calcular o valor da propriedade genérica ϕ no ponto e, as expressões para u positivo e negativo serão, respectivamente,

$$\phi_e = -\frac{1}{8}\phi_W + \frac{6}{8}\phi_P + \frac{3}{8}\phi_E \tag{5.25}$$

$$\phi_e = -\frac{1}{8}\phi_{EE} + \frac{6}{8}\phi_E + \frac{3}{8}\phi_P \tag{5.26}$$

Os pesos de cada ponto nas duas expressões anteriores aparecem da ponderação dos coeficientes de uma parábola passando pelos pontos W, P e E, quando u é positivo, e EE, E e P quando u é negativo.

A aproximação QUICK é ligeiramente superior à aproximação por diferenças centrais, mas ambas convergem com erro de segunda ordem, sendo raro observarem-se grandes diferenças entre os dois esquemas.

O método dos volumes finitos estabelece que para a obtenção de soluções reais algumas regras básicas devem ser satisfeitas (Patankar, (1980)). Uma delas refere-se à positividade dos coeficientes a_p e a_{nb} . Desta forma é fácil de se verificar que o esquema de diferença central pode, em determinadas circunstâncias, provocar a negatividade dos coeficientes e produzir soluções numéricas instáveis e com oscilações numéricas.

5.3- Acoplamento Pressão-Velocidade

A natureza segregada do processo de solução requer que cada variável tenha uma equação evolutiva para ser avançada (Maliska, 1995). As variáveis u , v e w podem ser avançadas pela equação do movimento em cada direção. Para avançar a pressão depende-se de o escoamento ser compressível ou não. Para cada um desses escoamentos, existe uma formulação adequada para atacar o problema.

O objetivo do acoplamento pressão-velocidade é, a partir da equação da conservação da massa na fase k , obter-se uma equação de natureza elíptica para a pressão atuante naquela fase.

O método SIMPLE (“Semi IMPLICIT Linked Equations”) é amplamente discutido na literatura. Trata-se de um procedimento de acoplamento pressão-velocidade a partir do cálculo de uma correção de pressão seguido de correções de velocidade e do cálculo da pressão.

Diversas variações do método SIMPLE são apresentadas na literatura (Patankar (1980) e Maliska (1995)). Dentre estas variações estão o método SIMPLER (SIMPLE Revisado) e o SIMPLEC (SIMPLE Consistente). Neste trabalho foram focalizados os métodos SIMPLE e SIMPLEC. A única diferença entre ambos é que no SIMPLEC os coeficientes a_p dos componentes de velocidade são calculados negligenciando-se as contribuições dos termos vizinhos. Isto evita a necessidade de uma severa relaxação para o cálculo de p , comum no método SIMPLE (Maliska (1995)).

5.4- Algoritmos de Resolução de Sistemas Lineares

Independente da dimensão do problema (seja ele uni, bi ou tridimensional), a discretização das equações resulta sempre num sistema linear que pode ser escrito sob a forma matricial. Tais matrizes caracterizam-se por possuírem um alto índice de esparsidade, ou seja, uma pequena razão de elementos não-nulos.

Após ser completamente determinado, o sistema de equações pode ser resolvido através de dois procedimentos: de forma direta ou de forma iterativa.

Nos métodos diretos é necessária a inversão da matriz completa. Por isso, tais métodos requerem o manuseio dos elementos de todos os pontos da matriz de coeficientes (inclusive os elementos nulos) influenciando de forma considerável na taxa de convergência do método.

Nos métodos iterativos o sistema de equações é resolvido parcialmente a cada iteração, partindo de uma estimativa inicial e obtendo uma resposta mais próxima da solução. Assim, várias iterações são necessárias para que a diferença entre a solução obtida e a solução real seja satisfatória.

Seja a matriz $A\phi=Q$, resultante de uma aproximação pelo método dos volumes finitos de um problema de escoamento. Após n iterações, tem-se uma solução aproximada ϕ^n , que não satisfaz exatamente estas equações, pois há um resíduo não nulo, ρ^n , tal que:

$$A\phi^n = Q - \rho^n \quad (5.28)$$

A diferença entre a Equação 5.28 e a equação $A\phi=Q$, obtém-se uma relação entre o erro de convergência, definido por:

$$\varepsilon^n = \phi - \phi^n \quad (5.29)$$

onde ϕ é a solução convergida, e o resíduo é dado por:

$$A\varepsilon^n = \rho^n \quad (5.30)$$

A suposição do procedimento de iteração é que ε e ρ tendem a zero. Para ver como isto pode ser feito, considere um esquema iterativo para um sistema linear, descrito a seguir:

$$M\phi^{n+1} = N\phi^n + B \quad (5.31)$$

Uma vez que, por definição, na convergência $\phi^{n+1} = \phi^n = \phi$, então, deve-se ter:

$$A = M - N \quad (5.32)$$

$$B = Q \quad (5.33)$$

5.4.1- Métodos Básicos:

O *Método de Jacobi* é o mais simples dos métodos, no qual a matriz M é a matriz diagonal cujos elementos são os elementos da diagonal A. Cada variável é determinada, assim, a partir dos valores já calculados para os seus vizinhos:

$$\phi_p^{n+1} = \frac{S_p - \sum_L a_L \phi_L^n}{a_p} \quad (5.34)$$

Para atingir a convergência, este método requer um número de iterações proporcional ao quadrado do número de nós em uma direção da malha. Isto significa que é mais dispendioso que algum outro método direto, daí, poucos são os motivos para utilizá-lo.

No *Método de Gauss-Seidel* a convergência é acelerada, fazendo-se com que, no somatório $\sum_L a_L \phi_L$ presente na equação (5.34), os valores de ϕ_L sejam tomados como ϕ_L^{n+1} , caso estes sejam disponíveis.

O *algoritmo TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algorithm)* faz parte dos métodos linha por linha. Nos métodos desta natureza, resolve-se diretamente uma linha; assim, em problemas bi e tridimensionais, que são compostos por várias linhas, este método é iterativo, resolvendo uma linha ou coluna por vez. Desta forma, o sistema a seguir:

$$a_p \phi_p = \sum_L a_L + S \quad (5.35)$$

É reescrito na forma (para problemas bidimensionais):

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + (a_N \phi_N + a_S \phi_S + b)^* \quad (5.36)$$

$$a_P \phi_P = a_N \phi_N + a_S \phi_S + (a_E \phi_E + a_W \phi_W + b)^* \quad (5.37)$$

Onde o asterisco denota valores obtidos na iteração anterior, sendo, desta forma, tratados como constantes. O sistema de equações é, então, tratado na forma:

$$A_L \phi_L = B_L \phi_{L+1} + C_L \phi_{L-1} + D_L \quad (5.38)$$

Que é o sistema tridiagonal para cada linha. Os coeficientes A, B, C e D são as constantes utilizadas no algoritmo TDMA.

Método Multigrid: Segundo Maliska (1995), a idéia básica do método Multigrid é a aceleração da convergência, reconhecendo que métodos iterativos ponto a ponto conseguem eliminar os erros com comprimentos de onda da ordem do tamanho da malha. Assim, se usarmos malhas desde bem refinadas até as mais grosseiras, com poucos volumes no domínio, eliminam-se os erros em todas as frequências e, por tanto, acelerando o processo de convergência. O procedimento é conceitualmente simples, bastando identificar na malha fina a direção na qual os coeficientes são dominantes e, na direção, criar uma malha mais grosseira. O procedimento de obter malhas grosseiras a partir de uma malha fina pode ser consultado em Maliska (1995).

5.5- Os Pacotes Computacionais

A disponibilidade difundida de estações de trabalho em engenharia, juntamente com eficientes algoritmos de soluções e sofisticados pré e pós-processadores facilitam e habilitam o uso de códigos comerciais CFD (também conhecidos como pacotes computacionais) para pesquisas em nível de pós-graduação, desenvolvimento, projeto e otimização em tarefas industriais.

5.5.1- Introdução à Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Fluidodinâmica Computacional (ou CFD) é a análise de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados tais como reações químicas, por meio de simulações baseadas em computador. Nos anos de 1960, progressos na indústria aeroespacial integraram técnicas CFD em projeto, pesquisa, desenvolvimento e construção de aeronaves e máquinas a jato. O uso da CFD na predição de escoamentos internos e externos aumentou surpreendentemente nas duas últimas décadas. Nos anos de 1980 a solução de problemas de escoamento de fluidos por meio de CFD foi o dominante em pesquisas acadêmicas e de pós-graduação. Mais recentemente, os métodos foram aplicados para projeto de câmaras de combustão interna de turbinas a gás e fornalhas. Ainda, motores de veículos produzidos agora prevêm força de arraste, escoamento de ar sobre capotas e arredores do carro usando CFD, tornando-o, ultimamente, um componente vital no projeto de produtos e processos industriais (Versteeg e Malalasekera, 1995).

Os códigos disponíveis no mercado são extremamente poderosos, mas sua operação ainda requer um alto nível de habilidade e conhecimento do operador para obter resultados significativos em situações complexas. Embora códigos comerciais CFD baseados no método dos elementos finitos tenham mais recentemente entrado em desgaste, o mercado é atualmente dominado por quatro códigos: PHOENICS, FLUENT, FLOW3D e CFX, que são todos baseados no método dos volumes finitos.

5.5.2- O Código Computacional FLUENT

O FLUENT é um programa computacional para modelagem de escoamento de fluidos e transferência de calor em geometrias complexas. Os tipos de malhas suportadas incluem malhas bidimensionais (triangular/ quadrilátero), tridimensionais (tetraédricas/ octaédricas/ piramidal/ cunha (fatia de bolo)), como também malhas mistas (híbridas). O FLUENT também permite refinar ou engrossar sua malha baseando-se na solução do escoamento. Esta capacidade de ter uma solução adaptativa para a malha é particularmente útil para que se atinja uma previsão acurada dos campos de escoamento em regiões com grandes gradientes, tais como camadas cisalhantes livres. Em comparação às soluções em malhas estruturadas ou em blocos, esta característica reduz significativamente o tempo requerido para gerar uma “boa malha”. Refinamento para as soluções adaptativas permite aperfeiçoar o estudo de refinamento de malhas e também reduz o esforço requerido para

atingir um desejado nível de acurácia, desde que o refinamento de malhas é limitado para aquelas regiões onde são necessárias melhores resoluções de malhas. Todas as funções requeridas para calcular uma solução e apresentar os resultados são acessíveis no FLUENT através de uma interface interativa em seu menu.

5.5.2.1- Características do Programa

Estrutura do Programa

O pacote FLUENT 6.0 inclui os seguintes produtos:

- FLUENT, o solver;
- PrePDF, o pré-processador para modelagem de combustão PDF no FLUENT;
- GAMBIT, o pré-processador para modelagem geométrica e geração de malhas;
- Tgrid, um pré-processador adicional que pode gerar volumes a partir de malhas já existentes;
- Filtros (tradutores) para importar superfícies e malhas de pacotes CAD/CAE tais como ANSYS, I-DEAS, NASTRAN, PATRAN, e outros.

Quanto à capacidade do programa, o FLUENT solver tem as seguintes habilidades de modelagem:

- Escoamentos incompressíveis ou compressíveis; Escoamentos turbulentos, laminar e invíscidos; Escoamentos Newtonianos ou não-Newtonianos;
- Transferência de calor, incluindo convecção natural ou forçada; Transferência de calor por condução/convecção acoplada; Transferência de calor por radiação;
- Modelos de referência inercial (estacionário) ou não inercial (rotação);
- Misturas e reações envolvendo espécies químicas, incluindo submodelos de combustão e modelos de reação de deposição em superfície.
- Cálculo de trajetórias lagrangeanas para uma fase dispersa de partículas/bolas, incluindo acoplamento com a fase contínua;

5.5.3- O Código Computacional CFX

O CFX é um código computacional integrado, para modelagem e simulação de escoamentos em problemas complexos e multidimensionais. O pacote resolve problemas incompressíveis ou compressíveis em estado estacionário ou transiente, além da possibilidade de simular o escoamento monofásico em regime laminar ou turbulento em

geometrias complexas. Malhas de blocos estruturados não-ortogonais são utilizadas para a discretização do domínio. O software ainda possui capacidades adicionais como predição de escoamentos compressíveis de natureza subsônica, transônica ou supersônica, incluindo a solução dos campos de temperatura em regiões sólidas do domínio, ou seja, sem a presença do escoamento fluido. Outras aplicações ainda incluem, por exemplo, a utilização do Modelo de Dissipação de Turbilhão (EDM – “*Eddy Dissipation Model*”) para a simulação turbulenta de misturas reagentes, sejam elas componentes físicos separados ou espécies químicas.

O CFX foi originalmente escrito em linguagem computacional FORTRAN e C, e faz uso das flexibilidades e potenciais oferecidos por estas linguagens de programação. Apesar dos pacotes comerciais serem conhecidos como verdadeiras “caixas pretas” onde o usuário não sabe exatamente o que o código faz, uma vez que este já vem compilado e assim não é passível de modificação, este código vem com uma facilidade chamada de “*Source Code Interface*”, que são algumas sub-rotinas disponíveis em linguagem FORTRAN, onde o usuário pode personalizar algumas informações julgadas necessárias para a simulação de seu respectivo problema. Todas as funções requeridas para calcular uma solução e apresentar seus resultados são acessíveis a partir do próprio código, através de uma interface interativa e gráfica denominada de CFX GUI (“*Grafical User Interface*”).

5.5.3.1- Características Gerais do Programa

Assim como os demais códigos computacionais desta natureza, o CFX apresenta basicamente três componentes: um pré-processador, um “*solver*” e um pós-processador. Cada um destes componentes corresponde a programas diferentes que lêem ou salvam vários arquivos, conforme necessário. No entanto, estes programas estão todos integrados na mesma interface. O pré-processamento é o estágio inicial de definição do problema onde várias etapas distintas devem ser realizadas. Uma destas etapas é a geração da malha, realizada no CFX Build e posteriormente no CFX Pre. A partir da versão CFX 5.7 (ANSYS® CFX®- 5™) não há mais o CFX Build. O CFX importa malhas, previamente construídas em outros geradores de malhas numéricas, como o CFX-HEXA por exemplo, e as transforma de forma que o código possa manipulá-la. Então, as condições de contorno devem ser especificadas corretamente. Uma vez especificadas, parte-se para a geração do “*Initial Guess*” do problema, que são valores necessários para se iniciar a simulação. Uma vez elaboradas todas estas etapas, parte-se para o CFX Solver. A fase final é a da análise dos resultados numéricos usando o CFX Post. O montante de dados produzidos pelo

“*solver*” é processado e apresentado graficamente de forma pertinente para que o usuário possa extrair toda e qualquer informação que ele necessite. Este pós-processador permite que o usuário crie vários tipos diferentes de imagens gráficas úteis, como gráficos de linha, contorno, campos vetoriais, iso-superfícies, entre outros.

5.5.3.2- Capacidades do Programa

O CFX tem várias capacidades poderosas e versáteis, o que permite seu uso em vários tipos de aplicações. Os métodos contidos neste pacote, para as simulações de escoamento fluido, consideram e enfatizam robustez, acurácia e eficiência.

A robustez resulta:

- da tecnologia do uso de um “*equation solver*” linear acoplado,
- da atenção aos detalhes de linearização das equações,
- dos procedimentos de integração temporal totalmente implícitos.

Quanto à eficiência, tanto para o usuário quanto para o computador, é baseada:

- no uso de esquemas lineares de aceleração multi-grid,
- na utilização de um sistema com malhas colocadas,
- no diagnóstico extensivo e prevenção de erros durante a simulação.

5.5.3.3- Aplicações do Código

O CFX vem sendo utilizado com sucesso nas mais variadas aplicações, dentre elas destacam-se:

- as indústrias de propulsão, com o uso de gases, líquidos e misturas multicomponentes. O software pode ser aplicado para escoamentos com combustão, escoamentos a altas velocidades e fronteiras móveis. Alguns exemplos são: volutas, turbinas a água e a gás, compressores, bombas, dispositivos de controle pneumático e cavidades.
- projeto e análise nas indústrias automotiva e aeroespacial, nas quais os escoamentos são externos (não confinados).
- aplicações nas indústrias de geração de energia e de trocadores de calor, nos quais as convecções livre e forçada, juntamente com análises de trocas térmicas nos dutos e em linhas de processo são necessárias.

- escoamentos nas indústrias de processos, como nas indústrias químicas, petroquímicas, de aço, papel, entre outras. Os escoamentos podem ser preditos em dutos, válvulas, aberturas, dispositivos dispersantes, separadores e ciclones.

5.6- Pacotes Comerciais para construção de Geometrias e Malhas Numéricas

5.6.1- O Pacote ICEM CFD HEXA

Na busca pela desejada integração entre as ferramentas de geração de malhas e de pós-processamento nas sofisticadas análises de hoje, o pacote ICEM CFD-HEXA fornece subsídios para a aquisição de geometrias avançadas, geração de malhas e ferramentas para a otimização e o pós-processamento das mesmas. Este pacote é largamente usado nas análises de Fluidodinâmica Computacional (CFD), mantendo uma estreita relação com a geometria do objeto em estudo, tanto durante a geração da malha quanto no pós-processamento.

As ferramentas de geração de malhas deste software oferecem a capacidade de criar malhas a partir de geometrias nos seguintes formatos:

- Estruturada e Multibloco;
- Não estruturada Hexaédrica.

Um módulo robusto de geometria suporta a criação e também a modificação de geometrias tridimensionais, formatos em tela de arame (“wireframes”) e superfícies regulares e um banco de dados aberto oferece a flexibilidade para combinar informação geométrica em vários formatos para a geração de malhas. As malhas (estruturadas ou não-estruturadas) resultantes, topologia, conexão entre os domínios e as condições de contorno são, então, alocadas num banco de dados, de onde podem ser trasladadas a arquivos de entrada formatados para um solver como o CFX ou o FLUENT.

As interfaces de CAD fornecem uma ponte entre ferramentas para a criação de geometrias paramétricas, disponíveis em sistemas CAD, e a geração de malhas computacionais, ferramentas de pós-processamentos e otimização de malhas disponíveis em CFD-HEXA. Especificamente no caso desta tese, a interface CAD Direto usado foi o ICEM DDN, disponível juntamente a este programa. Nele, foram geradas as geometrias dos

ciclones em estudo e, em seguida, transportadas para o ICEM-CFD Hexa para a construção da malha numérica.

O módulo de geração de malha semi-automático HEXA apresenta a geração rápida de malhas hexaédricas multi-blocos estruturadas ou não-estruturadas. Este tipo de programa representa uma nova abordagem na geração de malhas, onde as operações que seriam executadas mais freqüentemente por pessoas bem capacitadas, são agora todas automatizadas e podem ser executadas pelo simples toque de um botão. Os elementos hexaédricos apresentam como vantagens o fato de os volumes serem eficientemente preenchidos e são de melhor qualidade quando comparados aos elementos tetraédricos.

5.6.2- O Pacote GAMBIT

Na parte referente ao estudo dos programas pré-processadores, o objetivo reside em se estudar métodos de construção de geometrias e de malhas numéricas.

Inicialmente foi avaliado o programa GAMBIT. O GAMBIT é um pré-processador integrado para análises em fluidodinâmica computacional (CFD), vindo como parte integrante do software FLUENT, podendo ser usado para construir as geometrias em estudo e também gerar uma malha para tal geometria, como também importar uma geometria criada por um outro pacote, fazendo modificações e então gerando uma malha.

O GAMBIT mostrou uma certa dificuldade no que se refere à construção da geometria do ciclone, especialmente por se tratar de um pacote cujas ferramentas exigem um considerável conhecimento prévio em interfaces e programas especializados na confecção de geometrias. Principalmente no que se refere à construção de geometrias tridimensionais, objeto desta tese. Em virtude de seu pouco uso neste trabalho, será feita aqui apenas a menção deste pré-processador, não cabendo aprofundamento de suas características.

5.7- Geometrias e Malhas Numéricas

Conforme descrito no início deste capítulo, foram utilizados dois pré-processadores para a elaboração da geometria e da malha dos ciclones avaliados nos estudos de caso, a saber: o GAMBIT (programa pertencente ao pacote computacional FLUENT) e o ICEM-CFD Hexa. A partir das características geométricas dos estudos de casos apresentadas no capítulo 03 (Tabela 3.1), foram construídas as geometrias e, posteriormente, as malhas

numéricas para cada estudo de caso. A Figura 5.2 a seguir apresenta a geometria dos ciclones estudados nos casos 01, 02 e 03, bem como suas malhas numéricas.

As malhas numéricas para as propostas de modificação geométrica em ciclones serão apresentadas nos capítulos nos quais as mesmas serão estudadas.

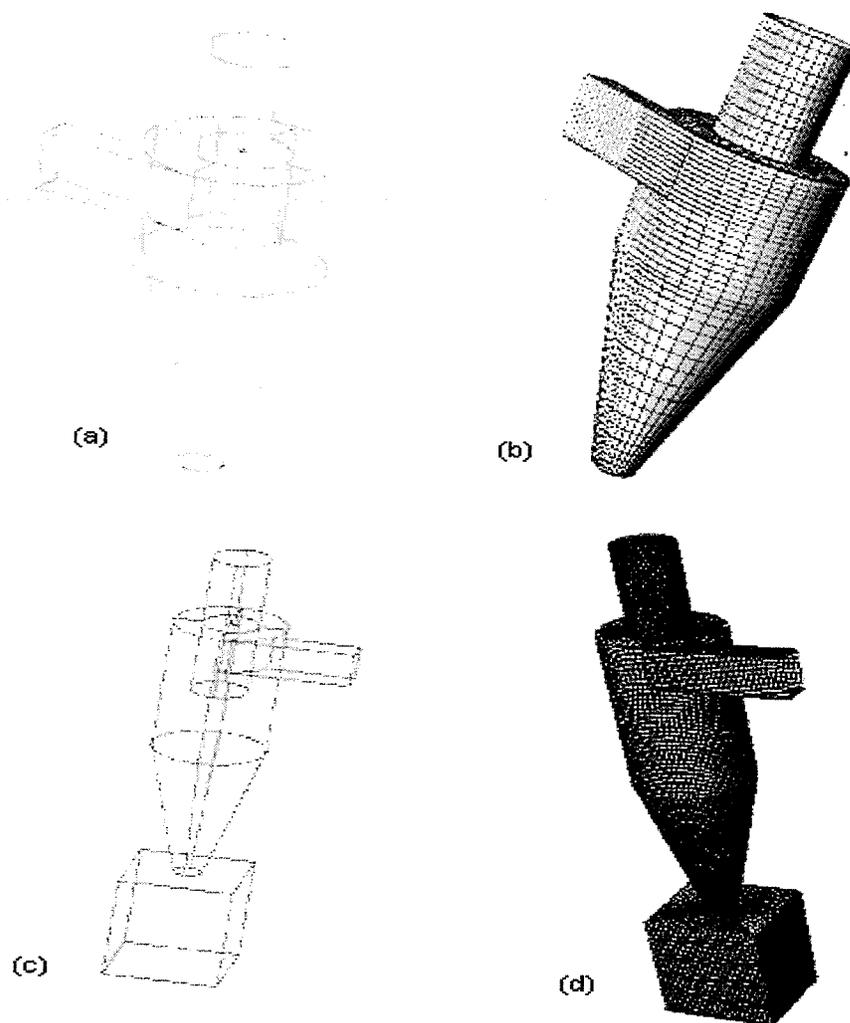


Figura 5.2: Geometrias e malhas dos casos estudados: Figuras (a) e (b) correspondem aos casos 02 e 03, e as Figuras (c) e (d) correspondem ao caso 01.

Para os estudos de caso 02 e 03 (conforme descritos na Tabela 3.1- capítulo 03) a malha numérica foi construída em dois pré-processadores. O primeiro pré-processador, GAMBIT, gerou uma malha muito refinada, com 103013 células tetraédricas. E o segundo pré-processador, ICEM-CFD HEXA, gerou uma malha numérica contendo 40872 células hexaédricas. O ciclone estudado no caso 02 também teve sua malha numérica elaborada nos dois pré-processadores. Neste caso, o uso do GAMBIT gerou uma malha numérica

contendo 303258 células tetraédricas, enquanto que usando o pré-processador ICEM-CFD HEXA, a malha numérica conteve 42696 células hexaédricas. A malha numérica do ciclone do caso 01 foi gerada apenas no ICEM CFD HEXA.

A diferença representada no número de células de cada uma das malhas numéricas influenciou nos resultados das simulações, tanto no que diz respeito ao esforço computacional quanto, principalmente, nos resultados dos experimentos numéricos obtidos. Isto será visto na apresentação e discussão dos resultados obtidos, objeto do próximo capítulo.

5.8 – Justificativa de uso de dois softwares para o desenvolvimento dos trabalhos.

Durante a realização da primeira parte do projeto (estudo do escoamento monofásico, a ser descrito na primeira parte do capítulo 06), os resultados foram obtidos utilizando o software FLUENT versão 6.0. Estes resultados obtidos apontavam uma boa concordância com os dados experimentais descritos na literatura, e até com outros dados numéricos disponíveis, no que tange à observação de zonas de recirculação, perfis de pressão e velocidade, por exemplo.

Com o início dos trabalhos do estudo do escoamento bifásico (gás-sólido), porém, não foi observado o mesmo rendimento obtido com os experimentos numéricos para o escoamento monofásico. As dificuldades começaram na estrutura de criação do problema bifásico dentro do FLUENT. Além disto, os experimentos numéricos tornaram-se muito morosos, desprendendo um esforço computacional muito grande para a conclusão de simulações que normalmente seriam mais rápidas.

O grupo de pesquisa do laboratório no qual este projeto foi desenvolvido (Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos –LMSPQ), Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP, tem em seu quadro alunos de iniciação científica, mestrado, doutorado e pesquisadores em pós-doutorado que atuam na área de CFD utilizando o software ANSYS® CFX®- 5TM (versões 4.4, 5.5, 5.5.1, 5.6 e 5.7). Então, realizou-se o mesmo experimento numérico para escoamento bifásico, paralelamente, usando o FLUENT e o CFX 5.5.1 e 5.6. Terminados os experimentos numéricos e confrontados os resultados, observou-se a viabilidade de utilizar nas etapas seguintes da tese o código CFX 5.5.1, 5.6, e 5.7, decisão embasada nas seguintes observações:

- O esforço computacional usando o CFX 5.5.1 foi significativamente inferior frente ao FLUENT. Critérios como convergência e estabilidade foram alcançados mais rapidamente. Em parte, isto se deve ao fato de que a estrutura dos usuários do CFX no LMSPQ permite a utilização de processamentos paralelos, estações de trabalho e clusters, enquanto que, como único usuário do FLUENT no grupo, as simulações eram conduzidas em computadores pessoais (PC), o que é inviável no caso de escoamentos multifásicos.

- Percebeu-se que seria mais viável economicamente a migração do trabalho para o software CFX, já que a licença acadêmica do FLUENT impedia sua utilização em processamentos paralelos ou estações de trabalho. A licença para tal uso teria seu valor triplicado, o que inviabilizaria o projeto para um único usuário.

- Ao trabalhar com CFX encontrou-se maior interação com os usuários do código, principalmente dentro do próprio grupo de pesquisa, e também fora deste. Isto permitiu uma maior troca de experiências e abriu espaço para discussões de problemas que sempre surgem, especialmente nesta área, algo considerado fundamental no âmbito da pesquisa. Enquanto usuário do FLUENT, contava-se apenas com o atendimento do suporte técnico da empresa responsável pelo software no país. Seu atendimento restringia-se apenas ao suporte técnico de utilização do software, não havendo muita contribuição para as dúvidas científicas dos problemas de engenharia enfrentados nesta tese.

Os resultados dos experimentos numéricos para o escoamento bifásico utilizando o CFX mostraram uma sensível melhora frente àqueles gerados no FLUENT e, associando as alegações feitas anteriormente, decidiu-se que as fases seguintes ao projeto teriam seus experimentos numéricos conduzidos com o código computacional CFX. Isto, em momento algum, minimiza ou põe dúvida sobre os resultados obtidos para o estudo do escoamento do gás em ciclones utilizando o FLUENT. É sabido que o esforço computacional necessário para simulações de escoamentos multifásicos é muito superior quando comparados com os problemas monofásicos.

Acredita-se, desta forma, que esta mudança não comprometeu o alcance do objetivo deste projeto. Ao contrário, tal mudança denota o propósito do pesquisador em ser fiel aos objetivos de seu trabalho, não medindo esforços para alcançá-los, mesmo que isto

signifique mudar seu software de trabalho e ter que aprender a lidar com uma nova ferramenta em pleno terceiro ano de realização do projeto. Com esta mudança, ganha o projeto porque não terá sua linha de pesquisa alterada nem seus objetivos comprometidos e ganha também o pesquisador, porque tem a oportunidade de apresentar em sua tese a visão de trabalho de dois pacotes computacionais em CFD e deixar para a comunidade científica as vantagens e as limitações de cada um, o que em muito enriquece este trabalho.

CAPÍTULO 06

RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS EXPERIMENTOS NUMÉRICOS **PARA O ESCOAMENTO DO GÁS EM CICLONES**

“Existem homens de bom senso que, por serem incapazes de decifrar as coisas que são "grego para eles", convencem-se de que a lógica e a filosofia estão acima deles. Pois bem, gostaria que vissem que, assim como a natureza os dotou de olhos com os quais enxergar as obras dela, também lhes concedeu cérebros para penetrar e compreendê-las.”

(Galileu Galilei)

6.1 – Apresentação

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos nas simulações do escoamento do gás em ciclone usando técnicas de fluidodinâmica computacional.

A abordagem é feita em duas partes. Na primeira parte são apresentados os resultados da avaliação do escoamento monofásico (gás) para os três estudos de casos apresentados na Tabela 3.1 (capítulo 03). Nesta fase do trabalho, os experimentos numéricos foram realizados com o software FLUENT. Na segunda parte, são apresentados os resultados envolvendo um estudo da influência de modificações geométricas no ciclone referente ao estudo de caso 01 (Tabela 3.1, capítulo 03) no escoamento do gás usando o código computacional CFX 5.5.1.

As equações de discretização, os esquemas de interpolação para as variáveis dos volumes de controle, o acoplamento pressão-velocidade, as técnicas numéricas para se garantir estabilidade das soluções numéricas, juntamente com os critérios de convergência, foram apresentados no capítulo 05.

6.2- Estratégia de Solução: A Escolha da Malha para a Realização dos Experimentos Numéricos

Na primeira parte dos experimentos numéricos, foram realizadas simulações para avaliar a capacidade de operação do software FLUENT frente ao esforço computacional para a realização das simulações, tomando como parâmetro inicial o refinamento da malha. Para tanto, foram utilizadas as simulações dos casos 01 e 02 apresentados no capítulo 03 (Tabela 3.1), avaliando as malhas geradas pelo GAMBIT e pelo ICEM CFD HEXA. A Tabela 6.1 mostra o esforço computacional para cada tipo de malha avaliada.

Tabela 6.1: Relação entre refinamento da malha e esforço computacional para as simulações em estudo.

SIMULAÇÃO	PRÉ-PROCESSADOR	NÚMERO DE CÉLULAS NA MALHA	TEMPO COMPUTACIONAL (Horas)
Caso 02	GAMBIT	103013	24 -48
Caso 02	ICEM-CFD HEXA	40872	6-12
Caso 01	GAMBIT	105258	48-72
Caso 01	ICEM-CFD HEXA	42696	6 -12

As simulações utilizadas neste estudo apresentaram as seguintes características: escoamento monofásico (gás), regime permanente (2000 iterações), modelo de turbulência k-ε padrão, acoplamento pressão-velocidade SIMPLE, esquema de interpolação upwind. De acordo com a Tabela 6.1, as malhas geradas pelo GAMBIT exigiram um maior esforço computacional em relação àquelas geradas pelo ICEM. As malhas geradas no pré-processador GAMBIT constituíam-se de células tetraédricas enquanto as malhas geradas pelo pré-processador ICEM CFD HEXA são hexaédricas. As malhas tetraédricas possuem 4 nós por elemento enquanto que as células hexaédricas possuem 8 nós por elemento. Daí, conforme se percebe na Tabela 6.1, para manter um número aproximado de nós entre os dois tipos de malhas, o número de elementos na malha gerada pelo GAMBIT era superior àquelas gerados pelo ICEM CFD HEXA, constituindo-se em malhas bem mais refinadas no caso do pré-processador GAMBIT. Quanto mais refinada a malha, maior o esforço

computacional, fato este previsível, uma vez que um maior número de células implicava num maior número de pontos e mais cálculos eram necessários para cada um destes pontos. Ressalta-se, no entanto, que não se afirma a superioridade de um pré-processador em função do outro. Não é esta a conclusão. Ambos são muito bons em seus fundamentos e satisfazem a finalidade de geração de malhas numéricas com a mesma eficácia. Apenas estabelece-se o porque do uso de um deles na realização dos experimentos numéricos.

Outra análise feita, em relação ao refinamento, foi a avaliação dos resultados iniciais, no que se refere aos perfis de velocidade média obtidos para cada tipo de malha. A Figura 6.1 mostra o perfil de velocidade média, obtido para o caso 02, no experimento numérico usando tanto a malha gerada no GAMBIT quanto pelo ICEM CFD HEXA, ambas comparadas aos dados reais de Yuu *et al.* (1978). A posição axial de $z = 0,19\text{m}$ (abaixo do topo do ciclone) é a referência para a tomada dos pontos apresentados na Figura 6.1.

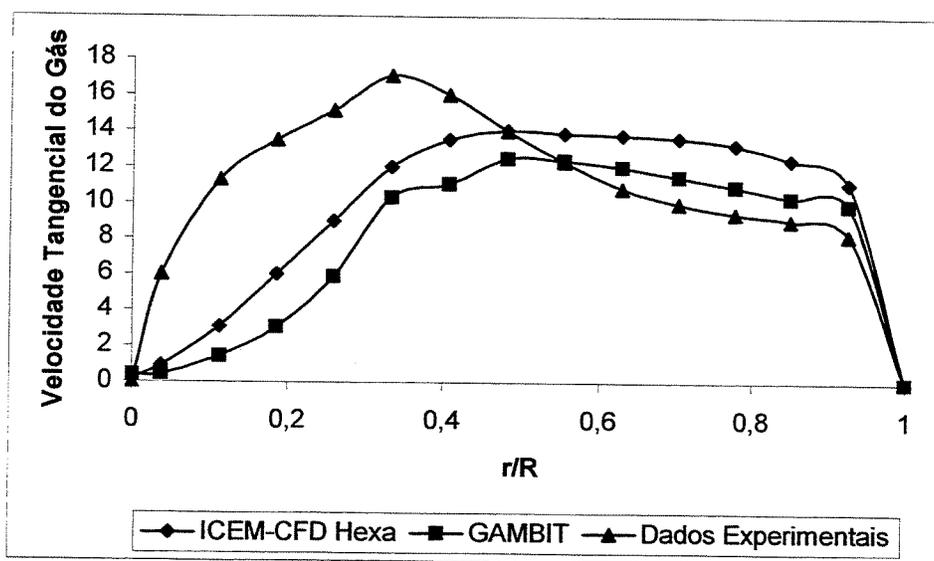


Figura 6.1: Perfis de velocidade para o caso 02, obtidos a partir dos dois pré-processadores estudados, e os dados experimentais de Yuu *et al.* (1978).

A mesma tendência de obtenção de melhores perfis de velocidade, usando as malhas geradas pelo ICEM-CFD HEXA, também foi observada para o estudo de caso 01. Então, levando-se em consideração tanto o esforço computacional (Tabela 6.1) quanto o estudo comparativo dos perfis de velocidade (Figura 6.1), optou-se por realizar as demais simulações e experimentos numéricos usando a malha gerada pelo pré-processador ICEM-

CFD HEXA, para os três estudos de caso escolhidos nesta fase. Em relação ao comportamento dos perfis de velocidade tangencial apresentados na Figura 6.1, observou-se o deslocamento do pico de velocidade tangencial do centro de simetria em direção às paredes. Este fato será discutido no próximo tópico, quando modelos de turbulência mais robustos foram aplicados e o mesmo comportamento foi observado.

6.3- Análise do Escoamento do Gás nos Ciclones Estudados

Para a realização dos experimentos numéricos, foram selecionados três estudos de caso da literatura. Dois deles pertencentes ao trabalho de Yuu *et al.* (1978), com velocidades de entrada do ar de 9,8 m/s e 13,4 m/s. O outro estudo de caso refere-se ao trabalho de Patterson e Munz (1996), com velocidade de entrada do ar de 15,2 m/s. Estes casos foram escolhidos devido ao fato de abrangerem uma considerável faixa de aplicações de ciclones e, além disso, tais trabalhos apresentam informações experimentais sobre os perfis de velocidade tangencial, necessários à corroboração dos modelos propostos (Meier,1998).

Partiu-se das conclusões de Meier (1998) no que diz respeito aos critérios de convergência e estabilidade das soluções numéricas frente aos métodos de acoplamento pressão-velocidade SIMPLEC, aos esquemas de interpolação UPWIND (de segunda ordem ou “higher upwind”) e aos modelos de turbulência. Uma vez que o código computacional, no caso atual, se distingue daquele usado por Meier (1998), algumas simulações foram realizadas com intuito de comprovar que tais parâmetros da solução numérica e da concentração da malha minimizariam o esforço computacional e garantiriam a obtenção de soluções numéricas estáveis e realistas.

A partir de tais resultados (os quais foram repassados para os demais experimentos numéricos) tentou-se uma corroboração do modelo matemático por meio da comparação das soluções numéricas com dados experimentais disponibilizados na literatura.

6.3.1 – Estudos de Casos

6.3.1.1- Yuu *et al.* (1978)

Conforme apresentado na Tabela 3.1, este caso se refere ao trabalho de Yuu *et al.* (1978), com velocidades de entrada do gás correspondente a 9,8 m/s e de 13,4 m/s. Neste estudo, os autores utilizaram um ciclone no qual foram determinadas as distribuições da componente de velocidade tangencial a uma posição de $z = 0,19$ m para baixo do topo da parte cilíndrica do ciclone.

Os primeiros resultados obtidos neste trabalho (considerando as velocidades de entrada do ar de 9,8 m/s e de 13,4 m/s) foram obtidos com o software FLUENT versão 6.0. As condições operacionais estão representadas na Tabela 3.1, sendo que todas as simulações nesta tese foram efetuadas considerando escoamento isotérmico. Os experimentos numéricos foram inicialmente conduzidos em regime permanente, num total de 600 iterações. Em seguida, estes resultados foram utilizados como arquivos de partida para simulações em regime transiente. Todas elas foram conduzidas para um tempo total de simulação de 10 s, com passo de tempo de $5 \cdot 10^{-3}$ s e um total de 4 iterações por passo de tempo.

6.3.1.1.1- Caso 02 – Velocidade do ar de entrada: $v = 9,8$ m/s:

Um número considerável de experimentos numéricos foi realizado neste caso, até se atingir os melhores resultados, que considerassem um conjunto envolvendo convergência, estabilidade e resultados satisfatórios. O conjunto da obra que forneceu tais resultados apresenta as seguintes características:

- ◆ Simulação tridimensional;
- ◆ Modelo de viscosidade: k- ϵ RNG (Modelo de Viscosidade Diferencial);
- ◆ Funções de Parede: “no slip” (sem deslizamento);
- ◆ Fatores de Relaxação:
 - Pressão: 0,30
 - Momentum: 0,70
 - Energia Cinética Turbulenta: 0,80
 - Taxa de Dissipação de Turbulência: 0,80

- ◆ Esquemas de Discretização:
 - Pressão: Standard (Padrão)
 - Acoplamento Pressão-Velocidade: SIMPLEC
 - Momentum: UPWIND de segunda ordem
- ◆ Critério de Convergência de Massa (continuidade): 1.10^{-5}

O modelo de viscosidade adotado foi o k-ε RNG. Através dos grupos de renormalização (“Renormalization Group–RNG”), este modelo permite ampliar as predições de escoamentos próximas à parede. Em relação aos esquemas de interpolação, o esquema upwind de segunda ordem é recomendado para resolver escoamentos em ângulos específicos da malha e, principalmente, quando se busca uma maior acurácia numérica na solução.

A Figura 6.2 mostra o perfil de distribuição da velocidade total do gás, enquanto que a Figura 6.3 mostra o perfil de distribuição da velocidade tangencial para o gás. O mapeamento destas velocidades (total e tangencial) para o escoamento do gás está representado nas Figuras 6.4 e 6.5, considerando o plano criado no eixo de simetria do ciclone (plano ZY, posição $x = 0$).

As Figuras de 6.2 a 6.5 apresentam a condição de que o escoamento está completamente desenvolvido. Depois de um período de simulação, os resultados visuais mantiveram-se inalterados, mostrando então que o escoamento encontrava-se plenamente desenvolvido (fato corroborado pela análise da Figura 6.4). Pela análise das Figuras 6.2 e 6.4, percebe-se que a velocidade total do gás atingiu um valor máximo de 15,9 m/s (tom mais escuro na região de entrada, localizada no canto superior esquerdo da parte cilíndrica). O perfil de velocidade mostra que a velocidade é máxima nas regiões próximas à parede do ciclone, reduzindo seu valor à medida que se aproxima do eixo de simetria do mesmo.

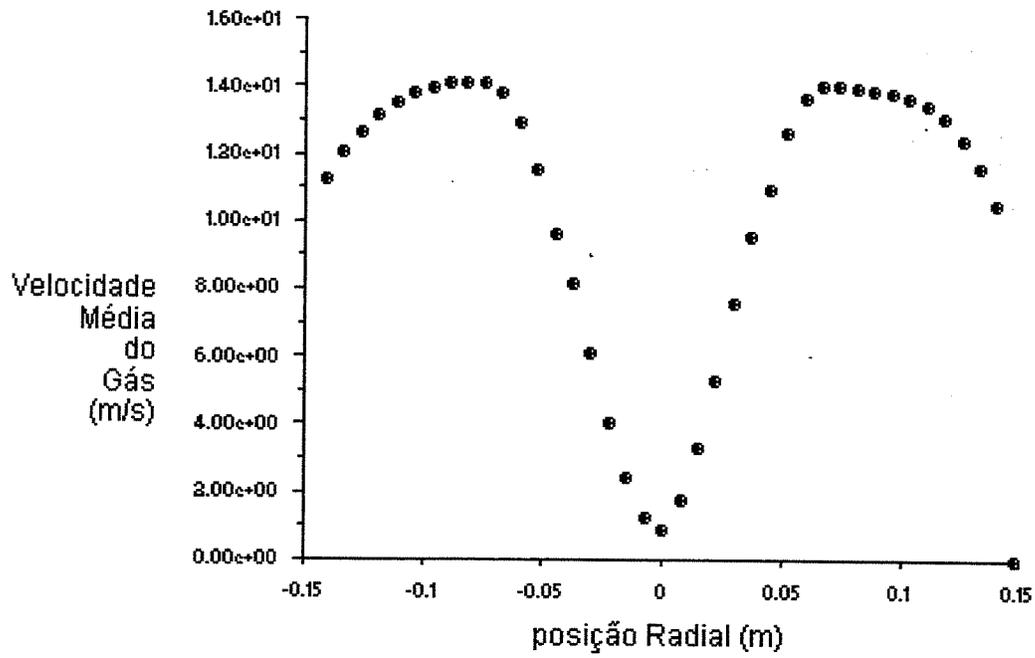


Figura 6.2: Distribuição da velocidade total do gás para o caso 02.

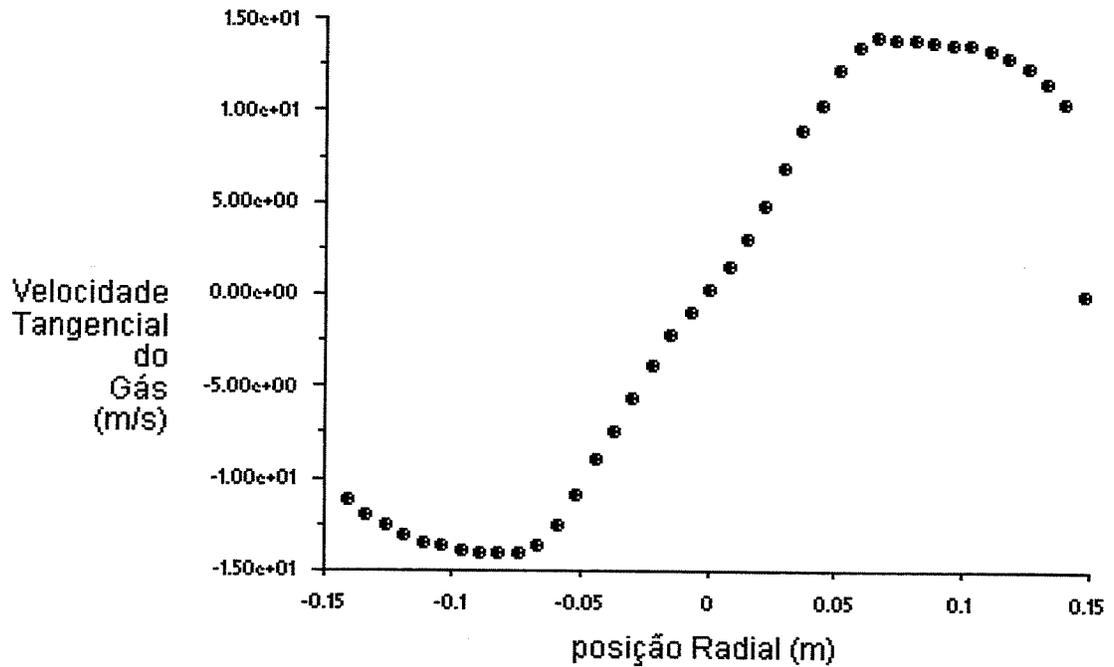


Figura 6.3: Distribuição da velocidade tangencial do gás - Caso 02.

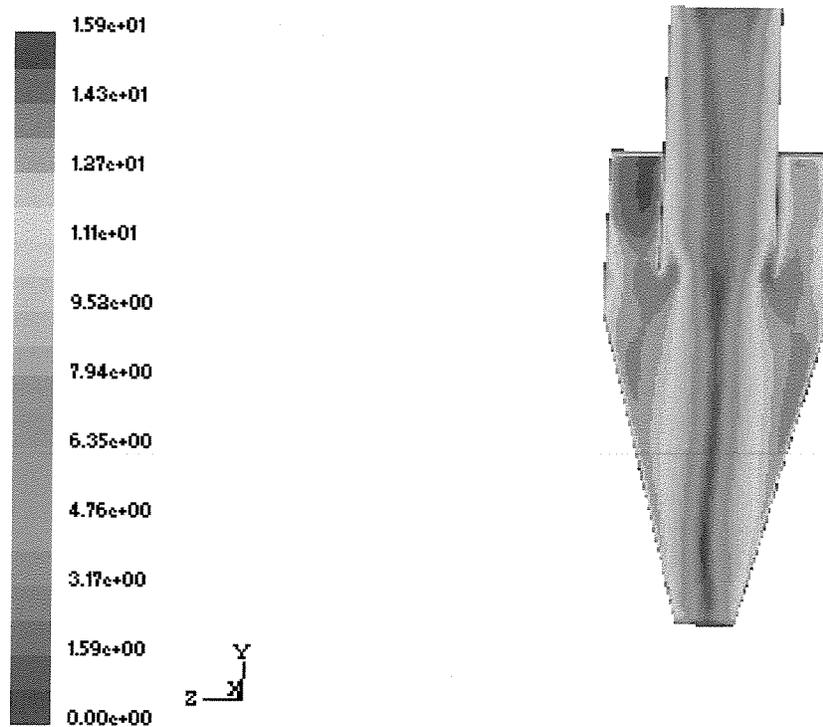


Figura 6.4: Mapeamento da velocidade total do gás - Caso 02.

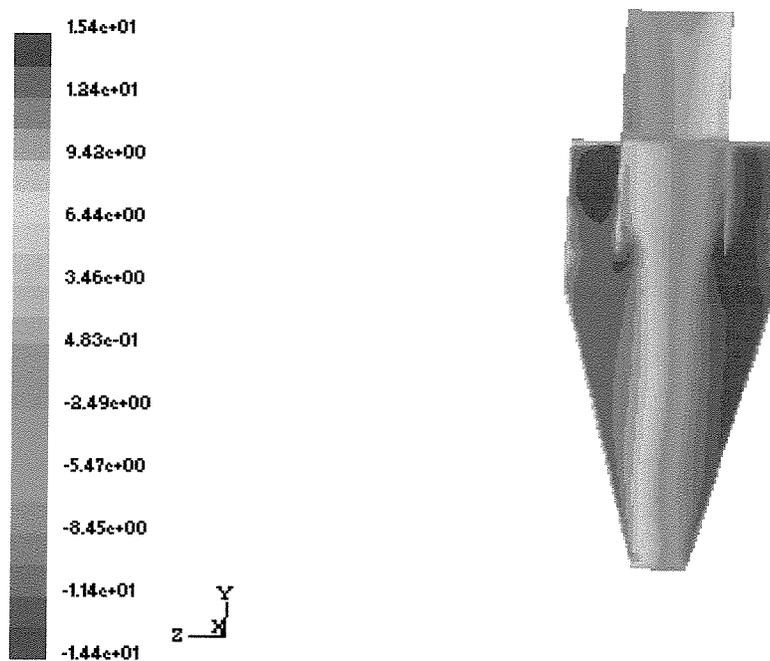


Figura 6.5: Mapeamento dos campos de velocidade tangencial do gás - Caso 02.

A análise das Figuras 6.4 e 6.5 revela que a vazão do gás entra no ciclone e inicia o seu escoamento giratório na seção anular compreendida entre o tubo de saída e o corpo do

ciclone. Observa-se ainda que o pico de velocidade máxima ocorre numa região compreendida, aproximadamente, entre o eixo de simetria e a posição correspondente ao duto de saída do gás, conforme sugerido por Ogawa (1997). E outra característica que pode ser comprovada refere-se ao efeito simétrico do módulo do vetor velocidade, em relação ao eixo de simetria do ciclone. Isto pode ser observado também pelos mapas de contorno dos dados de velocidade tangencial para esta simulação, apresentados a seguir, nas Figuras 6.4 e 6.5.

O pico de velocidade tangencial situa-se na posição radial média entre o tubo de saída do gás e a posição correspondente à parede externa do ciclone. Observa-se uma grande preservação de vórtice em direção à seção cônica do ciclone. Meier (1998) apresenta como uma provável causa deste fenômeno os fatores geométricos, tais como a proporção da seção cilíndrica em relação às demais seções, e à inclinação da seção cônica.

Quando da expansão do fluxo na entrada da seção cilíndrica, as Figuras 6.4 e 6.5 permitem ainda observar o comportamento da direção da velocidade tangencial do gás. Uma vez que o escoamento gira em torno do eixo. Esta mudança de velocidade é percebida pela mudança na coloração, de vermelho para azul, nos mapas de contorno que ocorre em todas as regiões (cilíndrica e cônica) do ciclone, apresentando picos de velocidade tanto ascendente quanto descendentes (tons de cores vermelho intenso e azul intenso).

Meier (1998) salientou que esta mudança de direção de fluxo do gás ocorre em praticamente toda a extensão do ciclone e que este fato, aliado a alta preservação de vorticidade, implica num ciclone com tamanho insuficiente do ponto de vista do seu comprimento natural (para um ciclone a gás, comprimento natural corresponde à altura abaixo da entrada do tubo de saída de gás para que ocorra a reversão e a atenuação do escoamento vorticial (Alexander (1949))). As características geométricas deste ciclone em estudo, segundo o conceito de Alexander (1949), lhe conferem um comprimento total inferior ao seu comprimento natural e por isso apresenta uma maior preservação de vorticidade e uma maior extensão de reversão do escoamento.

O mapeamento dos campos de pressão pode ser visualizado na Figura 6.6, abaixo apresentada.

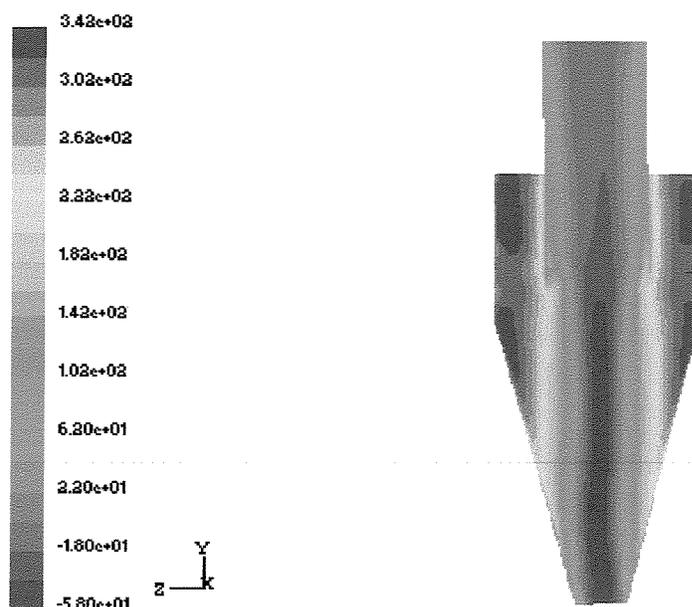


Figura 6.6: Mapeamento dos campos de pressão - Caso 02 (dimensões em Pa).

Percebe-se uma região de alta pressão na entrada do ciclone, diminuindo gradativamente à medida que vai se passando da parte cilíndrica para a parte cônica, da mesma forma que as posições radiais correspondentes àquelas da reversão do escoamento já observadas. Observa-se ainda um centro de baixa pressão localizado próximo ao tubo de saída do gás e adjacente ao eixo de simetria do ciclone. Tal centro de baixa pressão assume papel fundamental na fluidodinâmica do ciclone, influenciando diretamente na reversão do escoamento e na preservação de vorticidade, ou seja, quanto menor a região de baixa pressão, menor a região de alta vorticidade e mais rápida a reversão do escoamento (Meier, 1998).

Para a corroboração dos dados obtidos nas simulações, buscou-se extrair os pontos para a construção dos perfis de velocidade tangencial na mesma posição daqueles obtidos nos experimentos de YUU *et al.*(1978), os quais correspondem, no caso desta simulação: coordenada $x = 0,0$, $y = -0,19$ m (Altura do ciclone) e $z \in [-0,148$ m; $0,148$ m].

A Figura 6.7, a seguir, apresenta a comparação entre os perfis de velocidade tangencial numérico (caso atual) e experimental de Yuu *et al.* (1978).

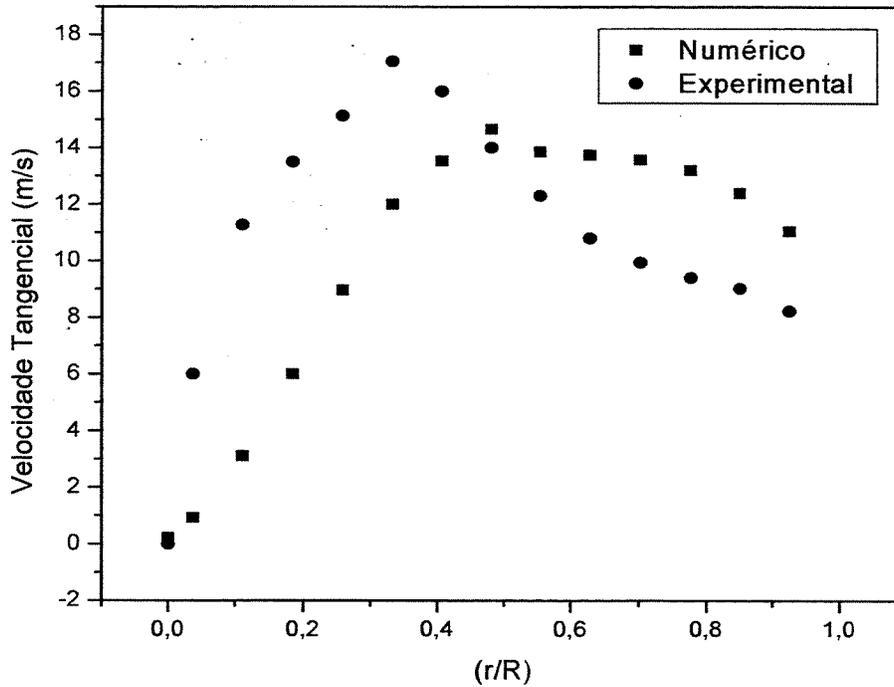


Figura 6.7: Perfil de velocidade tangencial para o caso 02: Comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.

Os dados numéricos mostram boa concordância com os experimentais, no que se refere ao perfil de velocidade tangencial, o que corrobora, por sua vez, o modelo usado neste estudo de caso. Observa-se, mais uma vez o deslocamento do pico de velocidade máxima. Uma causa para isto pode estar na forma de captação dos pontos experimentais de Yuu *et al.*(1978), no qual os autores usaram uma sonda bidimensional, que pode não fornecer medidas muito precisas de velocidade tangencial no centro do ciclone. Tais efeitos podem estar relacionados também a condição de que o modelo RNG-k- ϵ não capta com sucesso o pico de velocidade tangencial típico deste tipo de escoamento, tal como ocorre para o caso do modelo k- ϵ padrão. Os resultados numéricos de Meier (1998) também apontaram o mesmo comportamento.

6.3.1.1.2- Caso 03 – Velocidade do Ar de Entrada: $v = 13,4$ m/s:

Conforme apresentado na Tabela 3.1, Capítulo 03, este caso se refere ao trabalho de Yuu *et al.* (1978), com velocidade de entrada do ar correspondente a 13,4 m/s. Este caso corresponde ao mesmo ciclone e as mesmas características geométricas do caso 02, exceto apenas a velocidade do ar de entrada. O número de experimentos numéricos realizados até se atingir os melhores resultados, foi reduzido em relação ao caso 02, uma vez que já havia um treinamento prévio a partir das simulações daquele caso.

Os dados desta simulação são os seguintes:

- ◆ Simulação tridimensional;
- ◆ Modelo de viscosidade: k- ϵ RNG (Modelo de Viscosidade Diferencial);
- ◆ Funções de Parede: sem deslizamento (“no slip”);
- ◆ Fatores de Relaxação:
 - Pressão: 0,80
 - Momentum: 0,50
 - Energia Cinética Turbulenta: 0,80
 - Taxa de Dissipação de Turbulência: 0,80
 - Viscosidade Turbulenta: 1,00
- ◆ Esquemas de Discretização:
 - Acoplamento Pressão-Velocidade: SIMPLEC
 - Momentum: UPWIND de segunda ordem
 - Energia Cinética Turbulenta: UPWIND de segunda ordem
 - Taxa de Dissipação de Turbulência: UPWIND de segunda ordem
- ◆ Critério de Convergência de Massa (continuidade): 1.10^{-5}

O aumento da condição de velocidade de entrada do gás não influenciou os perfis de velocidade, conforme pode ser visto nas Figuras 6.8 e 6.9, apresentadas a seguir.

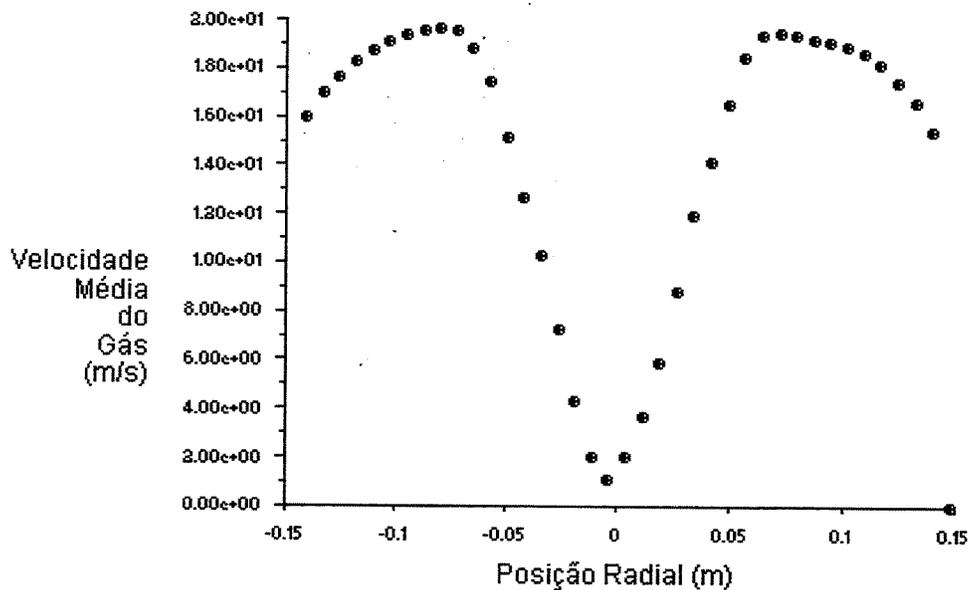


Figura 6.8: Perfil radial de distribuição da velocidade total do gás - Caso 03.

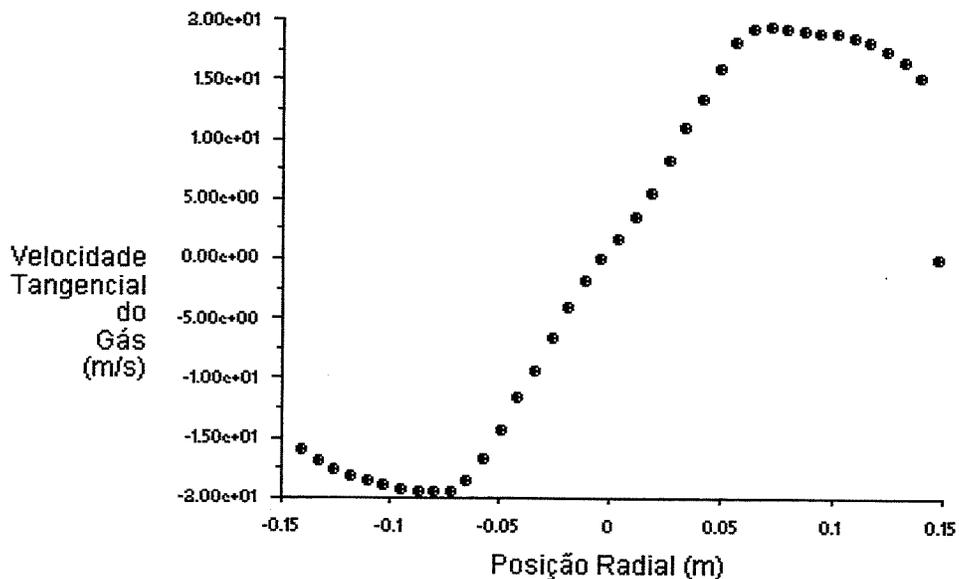


Figura 6.9: Distribuição radial da velocidade tangencial do gás - Caso 03.

Pode-se constatar ainda, pela que perfil fluidodinâmico do escoamento é o mesmo que o observado para o caso 02.

Uma vez que os perfis de velocidades e de escoamento são similares, cabem as mesmas discussões referendadas para as simulações do caso 02.

A seguir, a Figura 6.10 mostra o mapeamento dos campos de pressão para este estudo de caso. Nele, pode-se notar que prevalecem as mesmas regiões de alta e de baixa pressão observadas para o caso 02.

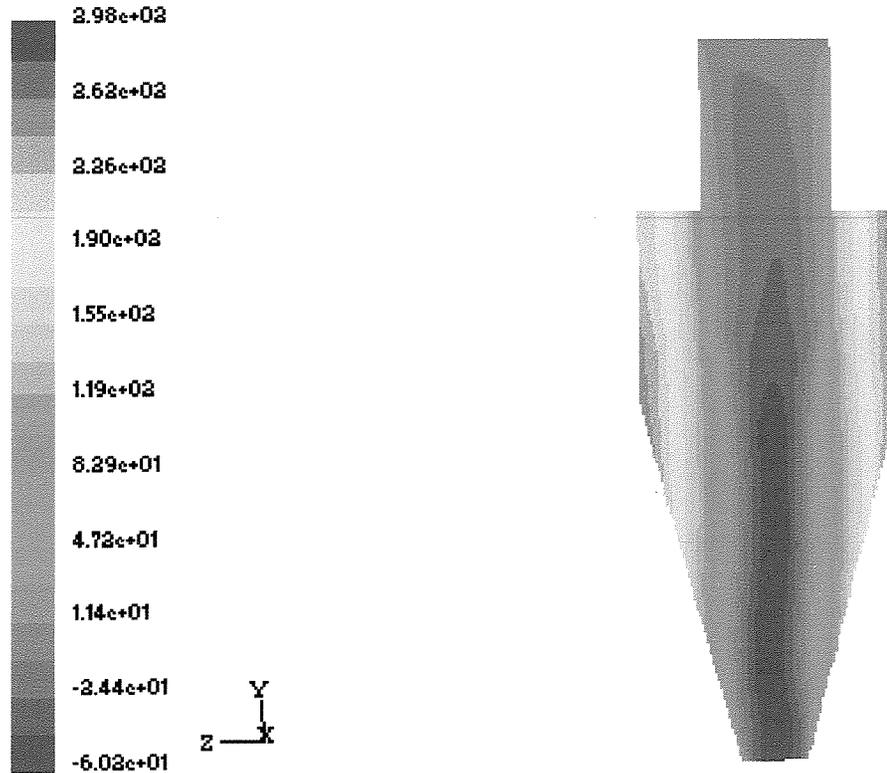


Figura 6.10: Mapeamento dos campos de Pressão (Pa) - Caso 03.

Para efeito de corroboração, foi obtido um pico de velocidade de 22 m/s, e o perfil da mesma, quando comparado aos dados experimentais de Yuu *et al.* (1978) mostram boa concordância (exceto nas regiões próximas ao eixo de simetria), conforme pode ser verificado na Figura 6.11, apresentada a seguir.

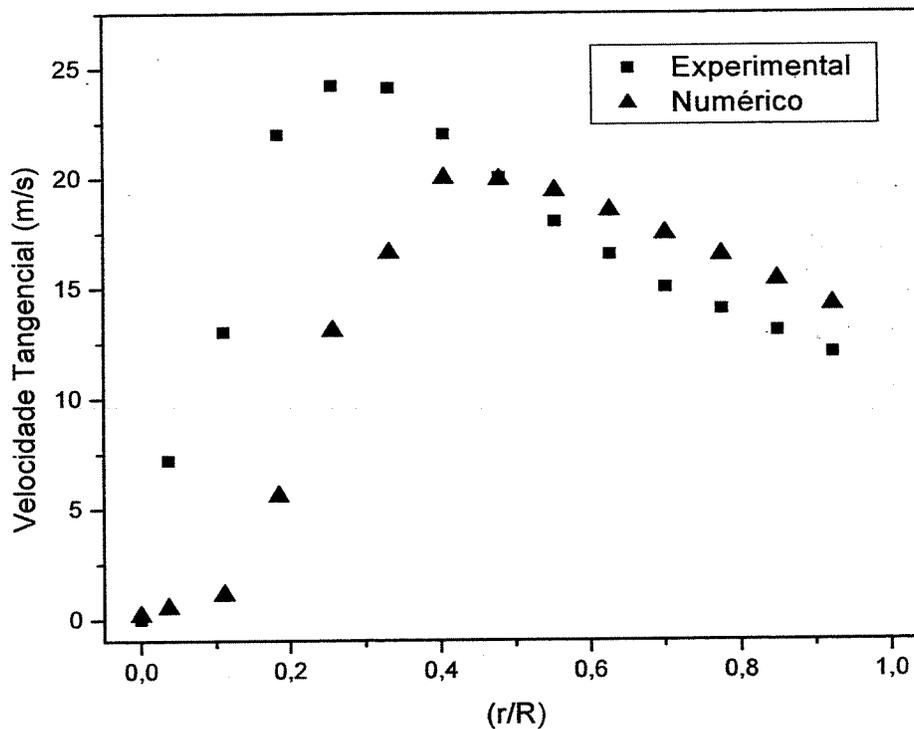


Figura 6.11: Perfil de velocidade tangencial para o caso 03: Comparação entre os resultados numéricos e os experimentais.

Mesmo não estando relatado como um estudo de caso nesta tese, mostrou-se oportuno um estudo comparativo entre os resultados numéricos atuais e os resultados numéricos encontrados na literatura, para o trabalho de Peres *et al.* (2001). Conforme descrito no capítulo 02, os autores trabalharam com os mesmos esquemas de interpolação e dados de simulação, tendo adotando o modelo de turbulência DSM (“Differential Stress Model”), que corresponde ao atual RSM, e o código computacional para as simulações foi o CFX 4.4.

As Figuras 6.12 e 6.13, a seguir, apresentam uma comparação entre os resultados dos experimentos numéricos de Peres *et al.* (2001) e os estudos de caso 02 e 03, respectivamente. O que se observa nestas figuras é uma boa concordância entre os experimentos numéricos destes trabalhos.

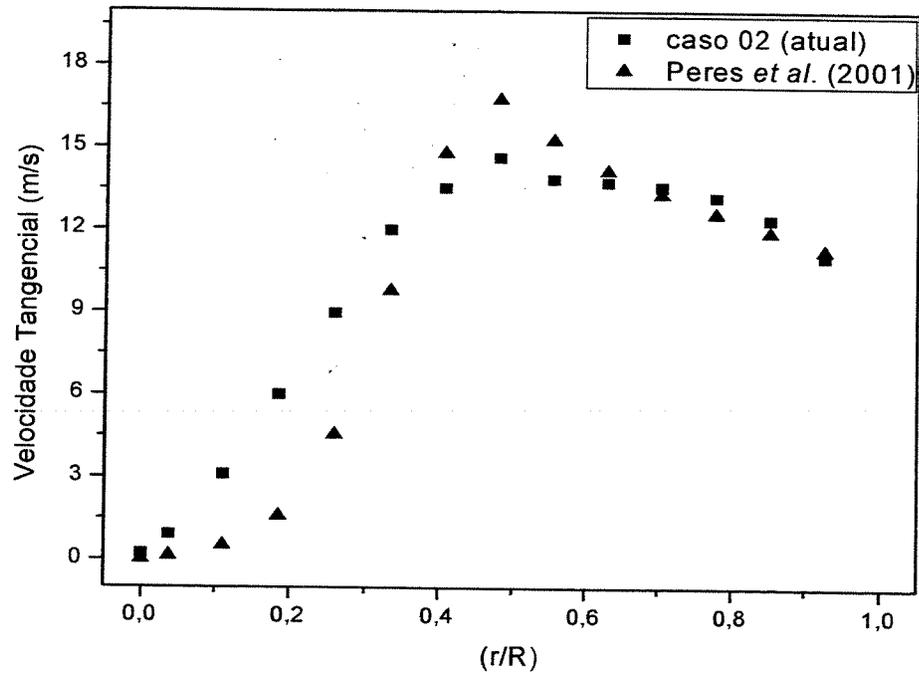


Figura 6.12: Comparação entre experimentos numéricos envolvendo o trabalho de Peres *et al.* (2001) e o caso 02 desta pesquisa.

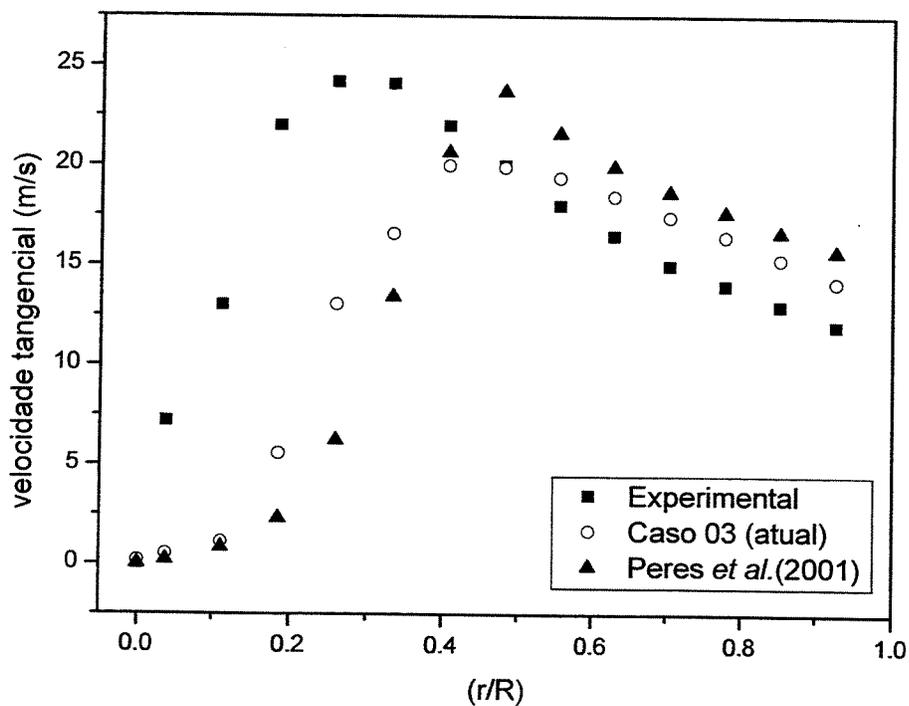


Figura 6.13: Comparação entre resultados envolvendo o trabalho de Peres *et al.* (2001), o experimental de Yuu *et al.* (1978) e o caso 03 desta pesquisa.

Esta comparação entre experimentos numéricos tem o intuito de mostrar que tem sido observado, nos experimentos numéricos, um deslocamento do pico de velocidade máxima, em relação aos trabalhos experimentais. Os dados referentes à velocidade vertical (axial) do gás não foram disponibilizados no trabalho de Yuu *et al.*(1978), impossibilitando desta forma um estudo comparativo com este parâmetro de velocidade.

Nos dois casos avaliados para os trabalhos de Yuu *et al.*(1978), os valores de velocidade inicial (9,8m/s e 13,4 m/s), estão bem próximos e por isso não houve uma influência significativa do parâmetro de velocidade de entrada do gás em propriedades tais como os picos de velocidade e a pressão do sistema.

6.3.1.2- Patterson e Munz (1996)

6.3.1.2.1- Caso 01 - velocidade do ar de entrada: $v = 15,2$ m/s

Conforme apresentado na Tabela 3.1, Capítulo 03, este caso se refere ao trabalho de Patterson e Munz (1996), com velocidade de entrada do gás correspondente a 15,2 m/s.

O número de simulações realizadas neste caso foi maior que aquelas apresentadas para os casos 02 e 03. Porém, para os casos nos quais foram estudados o modelo de turbulência k- ϵ padrão e os esquemas de interpolação UPWIND de primeira ordem, foram obtidos perfis de escoamento não desenvolvidos, com picos de velocidade bem inferiores aos apresentados na literatura, apesar de se ter atingido convergência para tais simulações. Este comportamento foi similar ao apresentado pelos estudos de caso 02 e 03 anteriormente descritos.

São apresentados os resultados do experimento numérico cujos dados da simulação são os seguintes:

- ◆ Simulação tridimensional;
- ◆ Modelo de viscosidade: k- ϵ RNG (Modelo de Viscosidade Diferencial);
- ◆ Funções de Parede: funções de parede padrão;
- ◆ Condições de contorno: velocidade de entrada = 15,2 m/s;
- ◆ Fatores de Relaxação:
 - Pressão: 0,80
 - Momentum: 0,50

- Energia Cinética Turbulenta: 0,80
- Taxa de Dissipação de Turbulência: 0,80
- Viscosidade Turbulenta: 1,00
- ◆ Esquemas de Discretização:
 - Acoplamento Pressão-Velocidade: SIMPLEC
 - Momentum: UPWIND de segunda ordem
 - Energia Cinética Turbulenta: UPWIND de segunda ordem
 - Taxa de Dissipação de Turbulência: UPWIND de segunda ordem
- ◆ Critério de Convergência de Massa (continuidade): 10^{-5} .

A avaliação dos resultados é feita através dos mapas de contorno e perfis de velocidade. No caso dos mapas de contorno, o plano escolhido é formado pelos pontos os quais correspondem no caso desta simulação : coordenada $x = 0$, $y \in [-0,051\text{m}; 0,051\text{m}]$ e $z = -0,12 \text{ m}$ (Altura do ciclone). Para este caso, o menor ciclone de todos os estudos de caso, o mesmo comportamento dos casos 02 e 03 foi observado para a velocidade tangencial.

A Figura 6.14, a seguir, apresenta o mapa de velocidade tangencial para o caso 01, enquanto a Figura 6.15, a seguir, mostra o mapeamento dos campos da velocidade axial do gás.

É possível notar a existência de um escoamento tipicamente tangencial, com a percepção de sua simetria em relação ao eixo do ciclone. Tem-se um escoamento tipicamente anular entre a seção de entrada e a anular, com um pico de velocidade levemente deslocado no sentido do centro do ciclone para as paredes da região cilíndrica.

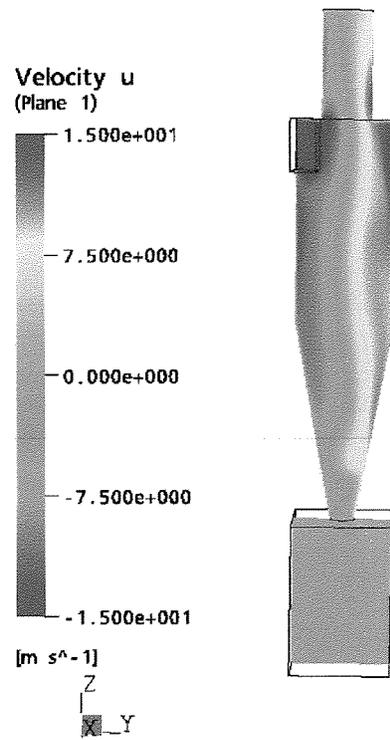


Figura 6.14: Mapeamento do campo de velocidade tangencial do gás - Caso 01.

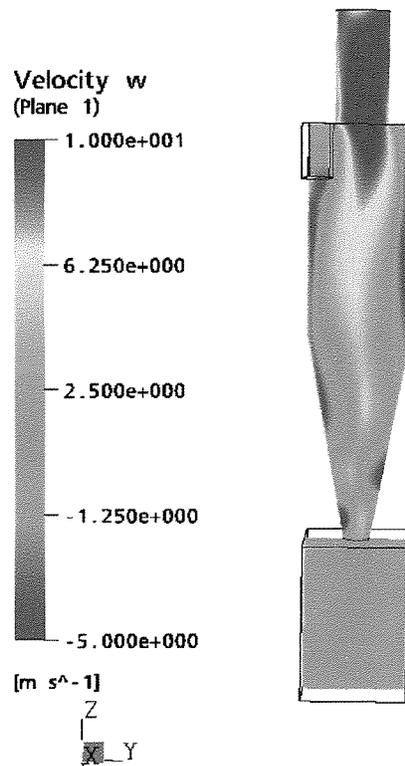


Figura 6.15: Mapeamento do campo de velocidade axial do gás - Caso 01.

Observa-se uma região de alto giro na entrada do tubo de saída do gás, como também a existência de um escoamento axial no tubo de saída do gás com velocidade máxima próxima a parede do tubo interno. Ao final da seção cônica, tem-se uma reversão localizada, típica de regiões de circulação de fluido.

Na página seguinte, a Figura 6.16, apresenta o mapeamento de velocidade radial para o caso 01, enquanto a Figura 6.17 apresenta o mapeamento dos campos de pressão no interior do ciclone deste estudo de caso.

Pode-se observar, na Figura 6.16 a existência de prováveis zonas de recirculação de fluido. Há regiões de velocidade radial positiva (em direção à parede) onde há, provavelmente, formação de zonas de recirculação. Um fenômeno que pode ser observado aqui e que também foi descrito por Meier (1998) está relacionado com a convecção preponderante, devido ao escoamento parabólico associado à região de entrada, provocando uma tendência à velocidade radial de permanecer negativa, em relação ao eixo de simetria, atingindo seu máximo na entrada do tubo de saída. Meier (1998) credita este efeito como sendo necessário à reversão do escoamento e que o mesmo ocorre devido, basicamente, a efeitos geométricos.

O perfil de pressão apresentado na Figura 6.17, é análogo àquele apresentado nos casos 02 e 03, com a visualização de uma região de baixa pressão na direção de entrada rumo ao tubo de saída do gás, como também adjacentes ao eixo de simetria. Conforme discutido anteriormente, esta região é típica de um escoamento com reversão rápida de fluxo.

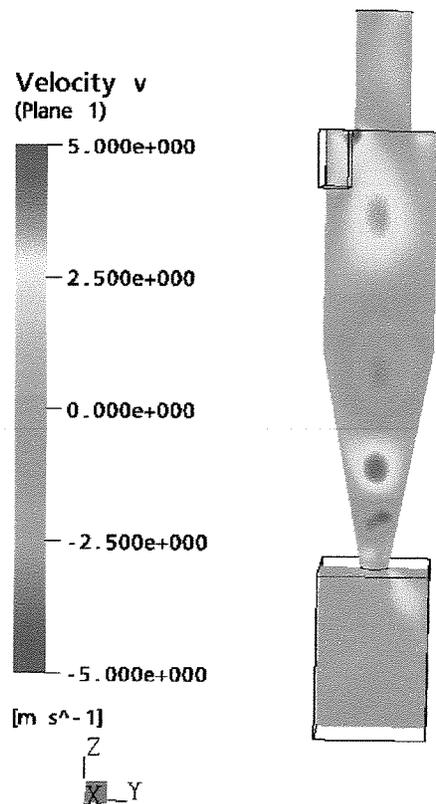


Figura 6.16: Mapeamento do campo de velocidade radial do gás - Caso 01.

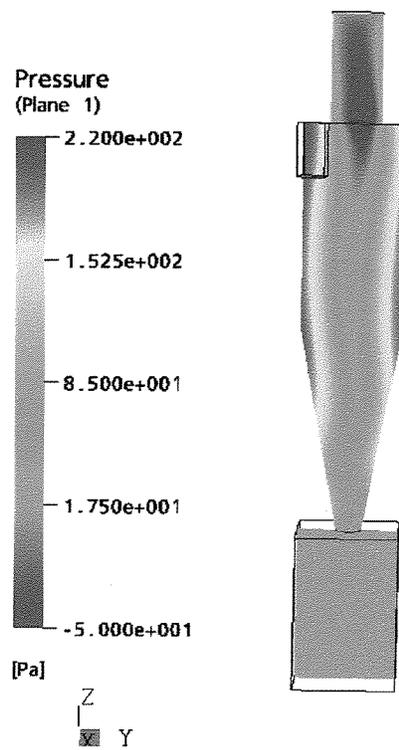


Figura 6.17: Mapeamento do campo de Pressão - Caso 01.

Uma vez que todas as características do escoamento foram descritas, apresenta-se a seguir uma comparação entre os resultados experimentais de Patterson e Munz (1996) e aqueles obtidos neste trabalho. Convém salientar que a quantidade de dados (pontos) disponíveis na literatura para este caso é pouca, tendo, então, uma curva com poucos pontos, como mostra a Figura 6.18.

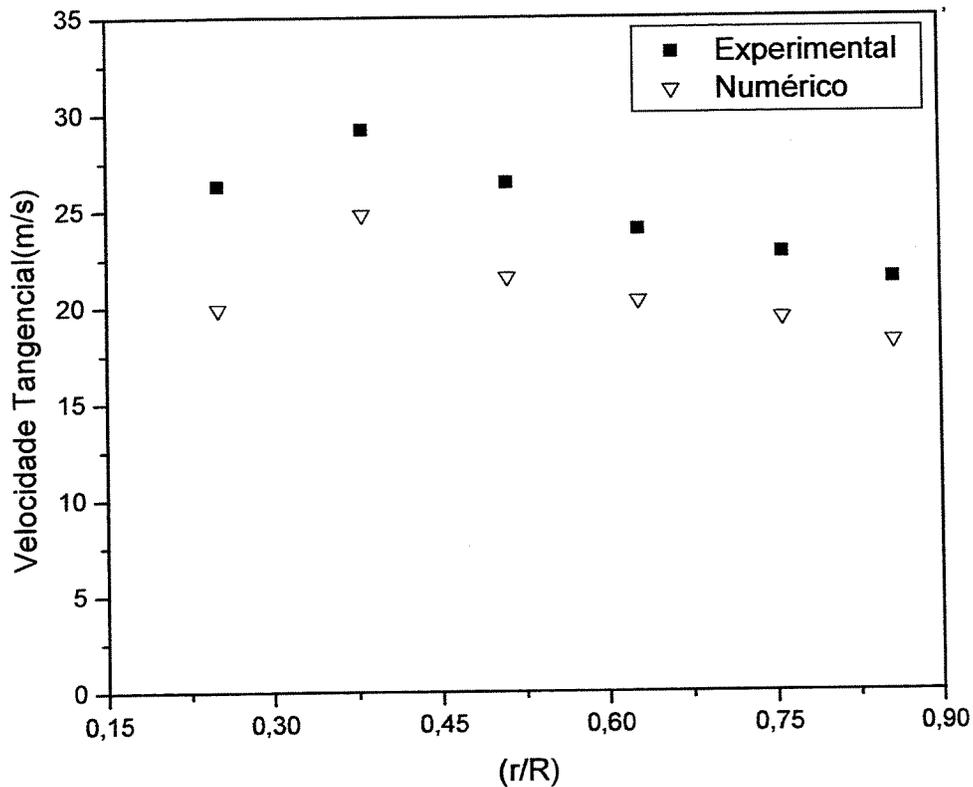


Figura 6.18: Perfil de velocidade tangencial para o caso 01: comparação entre os resultados numéricos e os experimentais.

Como se pode observar Figura 6.18, o perfil de velocidade tangencial obtido neste trabalho apresenta uma boa concordância com os dados experimentais de Patterson e Munz (1996).

6.4- Avaliação da Mudança de Parâmetros Geométricos na Fluidodinâmica dos Ciclones.

6.4.1 – Apresentação

O esforço científico visando aumentar o desempenho dos ciclones tem focalizado não apenas o estudo do comportamento fluidodinâmico deste equipamento, mas também mudanças em suas características geométricas. Tais alterações incluem, por exemplo, variações no diâmetro e nas seções de entrada e saída. Frequentemente, projetos de novos ciclones ou até mesmo de modificações estruturais são baseados em procedimentos empíricos. De tais procedimentos, surgiram várias idéias de modificações geométricas na seção de entrada, como o aumento de sua altura, largura ou do tipo da mesma (tangencial, em voluta, etc.). Esta parte do ciclone oferece uma gama de possibilidades ainda pouco conhecidas de modificações que muito poderiam melhorar o desempenho do equipamento.

Baseando-se, então, nesta linha de pesquisa, resolveu-se considerar neste estudo a avaliação da influência de uma modificação geométrica, representada pela substituição da entrada convencional do ciclone por uma entrada inclinada, em relação ao corpo do ciclone, sobre a fluidodinâmica do escoamento gasoso. Esta análise está baseada em inclinações na seção de entrada que variam de 30° a 60° , utilizando duas frentes, a saber:

- i) O trabalho de Patterson e Munz (1996), mostrado anteriormente no caso 01.
- ii) Um ciclone com características e dimensões industriais.

Como um estudo comparativo, foram utilizados os dados experimentais disponíveis na literatura especificada no item (i) acima, tomada como base deste estudo, como também os resultados das simulações numéricas realizadas por Peres (2002) para este mesmo caso. É importante ressaltar que não é possível neste caso fazer uma validação do modelo, pois não há registro de dados experimentais na literatura para tal tipo de ciclone (entradas inclinadas). O que se fez foi comparar os dados gerados a partir do ciclone inclinado deste trabalho com os dados de Patterson e Munz (1996) e Peres (2002) e então verificar as mudanças nos perfis de velocidade e pressão advindos desta modificação. Para o caso (ii) não há disponibilidade de dados na literatura.

6.4.2- Estudo da Influência do Ângulo da Seção de Entrada na Fluidodinâmica do Escoamento em Ciclones de Bancada.

6.4.2.1- Inclinação de 45⁰ na Seção de Entrada do Ciclone Descrito por Patterson e Munz (1996)

A geometria do ciclone usada neste trabalho foi baseada em Patterson e Munz (1996), na qual modificou-se a geometria da seção de entrada inclinando-a de 45⁰ para cima em relação ao corpo do ciclone. As demais características geométricas deste ciclone (apresentadas na Tabela 3.1, Capítulo 3) foram mantidas constantes.

A malha numérica do ciclone com entrada inclinada foi gerada usando o código computacional ICEM CFD HEXA. Várias malhas foram construídas, com números variados de células. A malha que reuniu as melhores especificações (esforço computacional compatível, convergência e resultados) para o estudo do escoamento gasoso neste ciclone possui 49800 células hexaédricas, sendo, então, a malha usada em todos os experimentos numéricos desta fase da pesquisa.

Os experimentos numéricos foram realizados utilizando os códigos computacionais CFX 5.5.1 e CFX 5.6, conforme as justificativas apresentadas no Capítulo 05. O algoritmo de acoplamento pressão velocidade SIMPLEC (SIMPLE Consistente) e o esquema de interpolação UPWIND de ordem superior foram utilizados em todos os experimentos numéricos.

A Figura 6.19, a seguir, apresenta as malhas numéricas estudadas nesta fase do trabalho.

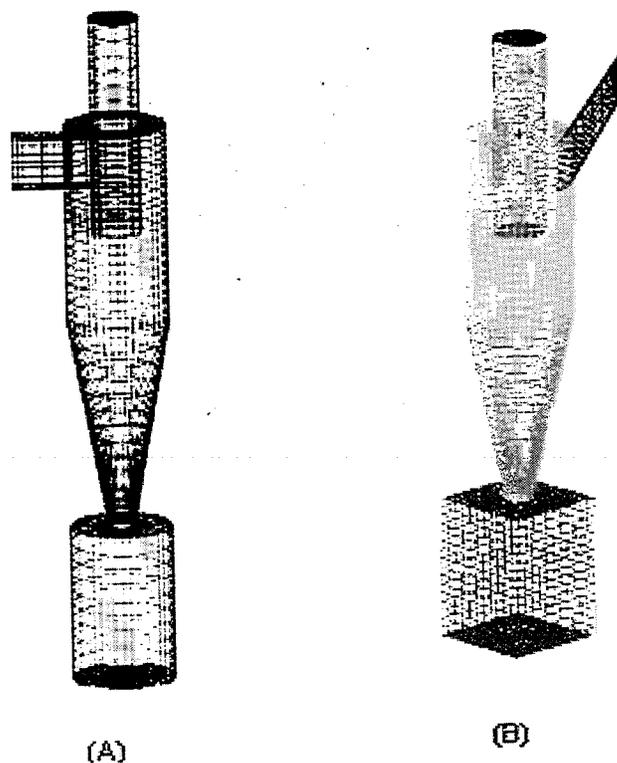


Figura 6.19: (A) Malha numérica para o caso Patterson e Munz (1996) e (B) Malha Numérica para o caso em estudo (inclinação de 45° na entrada).

Primeiramente, foram realizados experimentos em regime permanente, com um total de 500 iterações e usando como critério de parada uma acurácia de 1.10^{-5} para a norma euclidiana da fonte de massa. Em seguida, realizaram-se os experimentos numéricos em regime transiente, tomando os resultados em regime permanente como arquivo de partida. No caso das simulações em regime transiente, adotaram-se três iterações por passo de tempo, sendo tais passos de tempo de 5.10^{-3} s e um tempo total de simulação de 10 s. Estas etapas foram cumpridas tanto para o modelo de turbulência RSM. O estudo foi conduzido para o escoamento em fase gasosa, assumindo estar nas condições Padrão (STP) de temperatura e pressão. Três velocidades de entrada para o gás foram consideradas neste estudo: 2,75 m/s, 7,75 m/s e 15,2 m/s (conforme os trabalhos de Patterson e Munz, 1996). Para cada uma destas velocidades, foram realizados os experimentos numéricos descritos anteriormente. As condições de contorno foram consideradas como perfis uniformes na região de entrada, para todas as variáveis, condição de não deslizamento nas paredes e condições de pressão atmosférica na região de saída do finder.

Conforme apresentado na introdução deste capítulo, a validação do modelo proposto para este estudo não foi possível, pois não há trabalhos científicos na literatura descrevendo tal estudo experimental ou numérico. Porém, ressalta-se que o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de tais condições geométricas no escoamento. Assim sendo, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos com uma entrada tangencial convencional e a entrada inclinada proposta. Os dados experimentais tomados como base foram os encontrados na literatura (Patterson e Munz, 1996) e também se fez uso de dados de simulações numéricas disponíveis para algumas das condições de entrada deste estudo de caso, obtidos de Peres (2002), no qual tais autores fizeram simulações numéricas do caso experimental de Patterson e Munz (1996) mantendo as mesmas condições numéricas deste trabalho, através do código computacional CFX versão 4.4.

6.4.2.1.1- Resultados para o Escoamento do Gás

As simulações iniciais foram realizadas em regime permanente, para cada uma das velocidades iniciais descritas nas condições de contorno. Porém, tais experimentos numéricos resultaram em arquivos de dados não descritivos do processo (comum em simulações numéricas em regime permanente envolvendo escoamento turbulento). Em vista disto, não serão apresentados aqui os resultados destes experimentos. Apenas esclarece-se que os resultados gerados em tais simulações foram úteis como condições iniciais para os trabalhos em regime transiente. Convém ressaltar que diversas tentativas e ajustes nas simulações foram realizados até que se chegasse aos resultados apresentados neste trabalho. As assim chamadas “simulações de ajuste do problema” são ferramentas úteis durante a construção do modelo. Os resultados apresentados fazem uso do modelo de turbulência RSM, que apresentou os melhores resultados.

A Figura 6.20, a seguir, apresenta a solução numérica para a distribuição da velocidade tangencial no caso em estudo (Patterson e Munz, 1996), enquanto que as Figuras 6.21, 6.22, 6.23, 6.24 e 6.25, listadas nas páginas seguintes, apresentam as soluções numéricas e comparações com os perfis de Patterson e Munz (1996) e Peres (2002), para as distribuições de velocidade axial e tangencial do gás obtidas numa altura de 0,12 m a partir do topo da parte cilíndrica do ciclone.

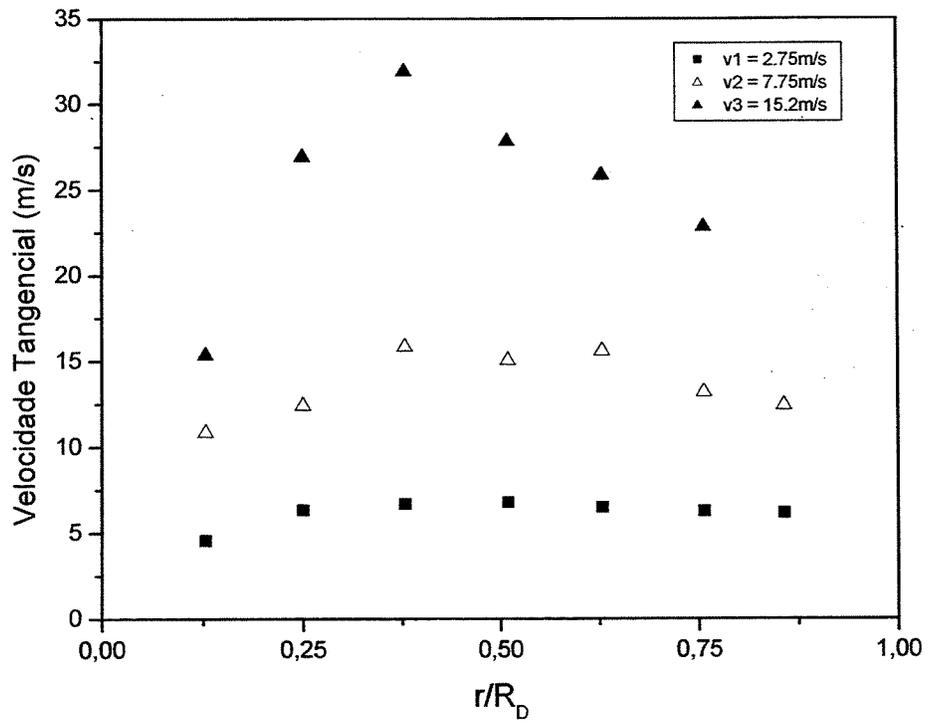


Figura 6.20: Distribuição do componente de velocidade tangencial (Patterson e Munz, 1996).

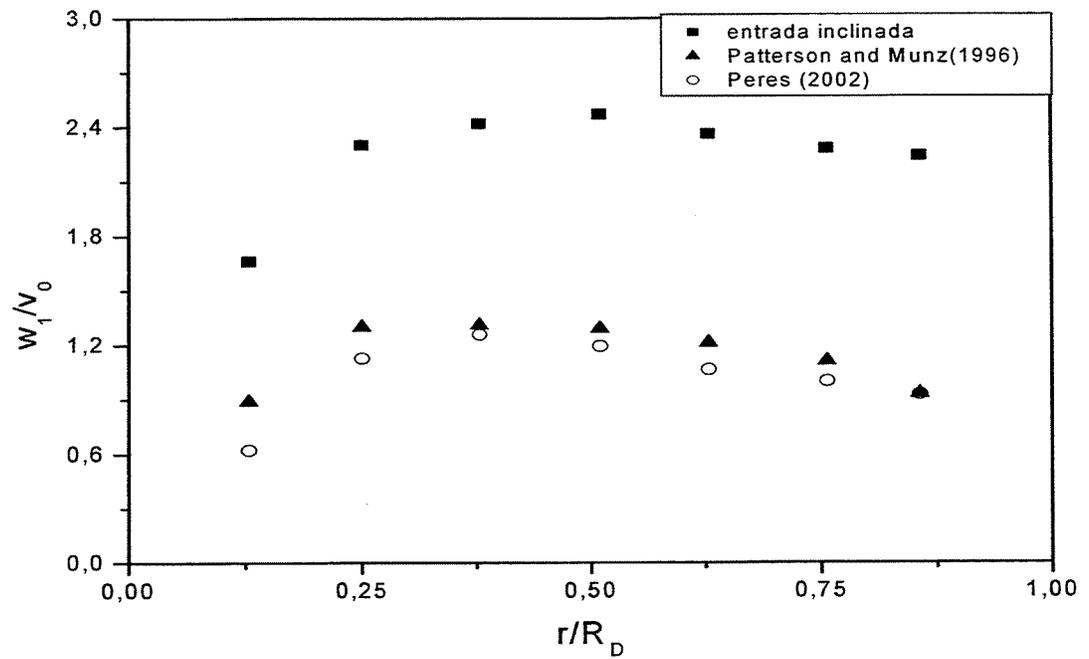


Figura 6.21: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 2,75 \text{ m/s}$).

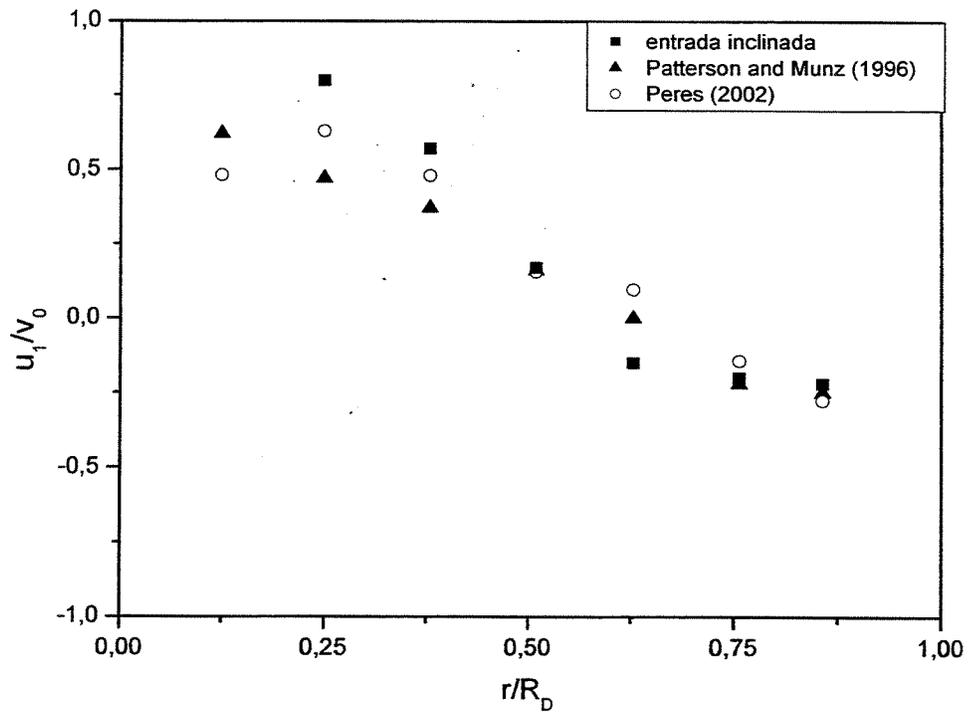


Figura 6.22: Distribuição da velocidade axial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 2,75$ m/s).

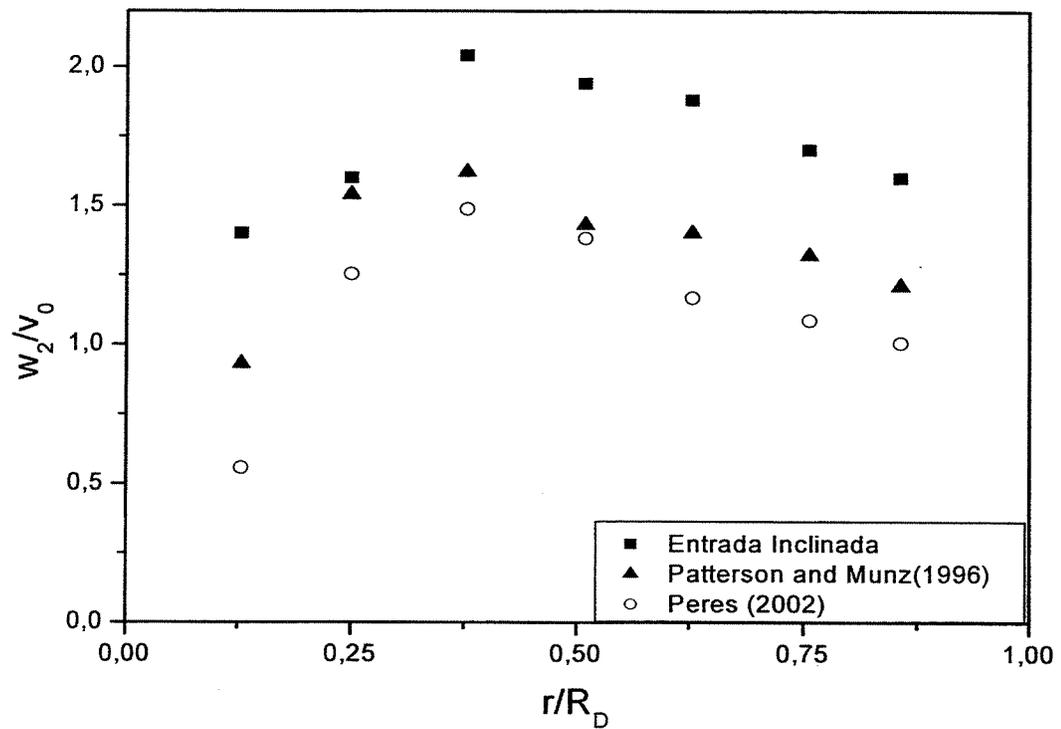


Figura 6.23: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 7,75$ m/s).

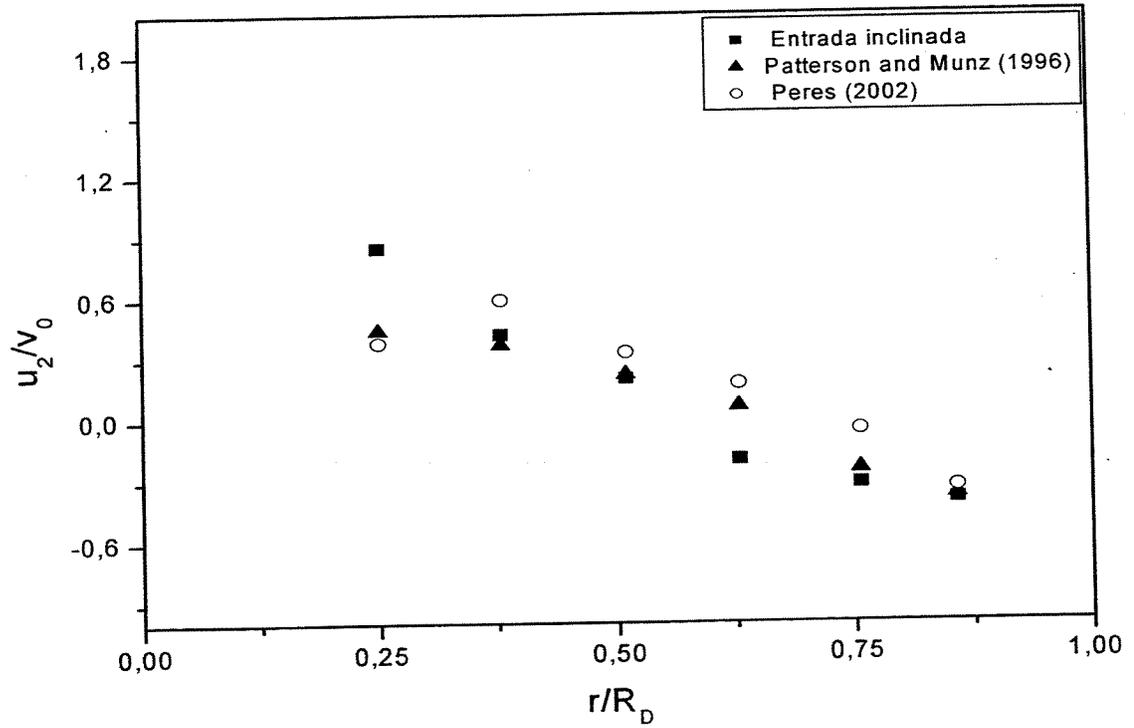


Figura 6.24: Distribuição da velocidade axial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 7,75$ m/s).

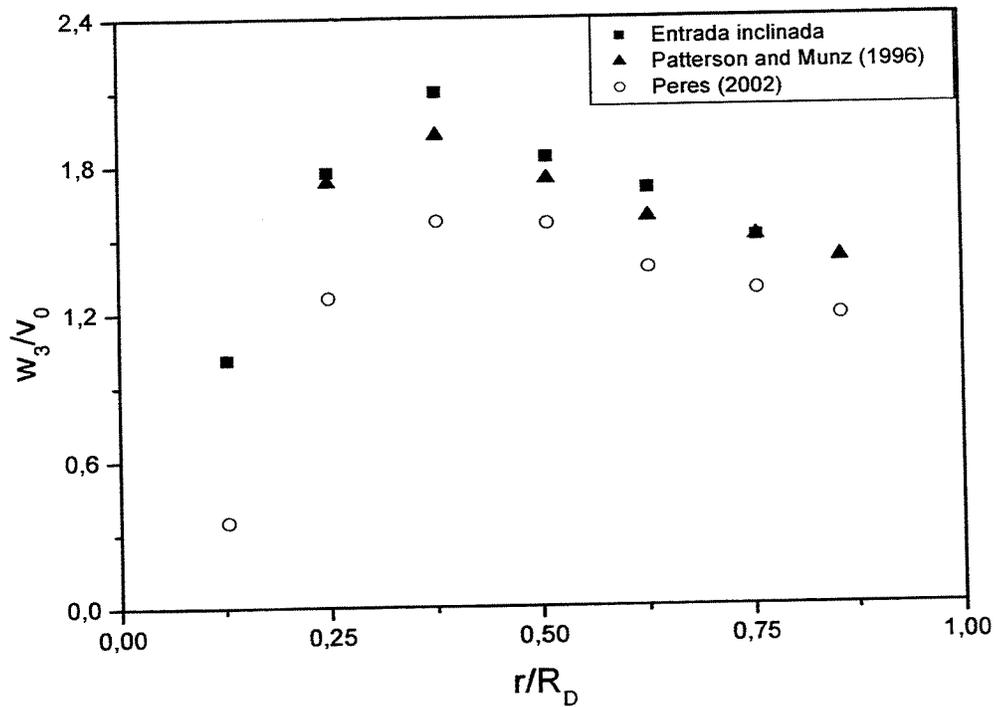


Figura 6.25: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 15,2$ m/s).

Dados obtidos através do modelo de turbulência RSM aplicado, representando os perfis de distribuição radial das velocidades axial e tangencial no ciclone, foram comparados com dados numéricos simulados por Peres (2002), como também por Patterson e Munz (1996). Todas as figuras representando este estudo comparativo mostraram haver grande concordância entre os perfis representativos de tais dados. Os resultados numéricos evidenciaram uma boa representação do escoamento turbulento no ciclone. A inclinação de 45° da seção de entrada, em relação ao corpo do ciclone, causou o aumento dos valores de velocidade tangencial quando comparados com a entrada tangencial usual, representada nos trabalhos de Patterson e Munz (1996) e Peres (2002). Este aumento pode ser verificado principalmente no caso das menores velocidades de entrada do ar ($v = 2,75 \text{ m/s}$ e $v = 7,75 \text{ m/s}$).

Os perfis de distribuição radial da velocidade tangencial para o caso em que a velocidade do ar de entrada é de $2,75 \text{ m/s}$, apresentados na Figura 6.21, permitem observar maiores velocidades de giro, as quais chegam a ser equivalentes ao dobro dos valores obtidos experimentalmente por Patterson e Munz (1996), sem o uso da inclinação de 45° . Tomando como base a velocidade do ar de entrada de $2,75 \text{ m/s}$, podem-se apresentar os mapas de velocidade e de pressão, mostrados nas figuras a seguir.

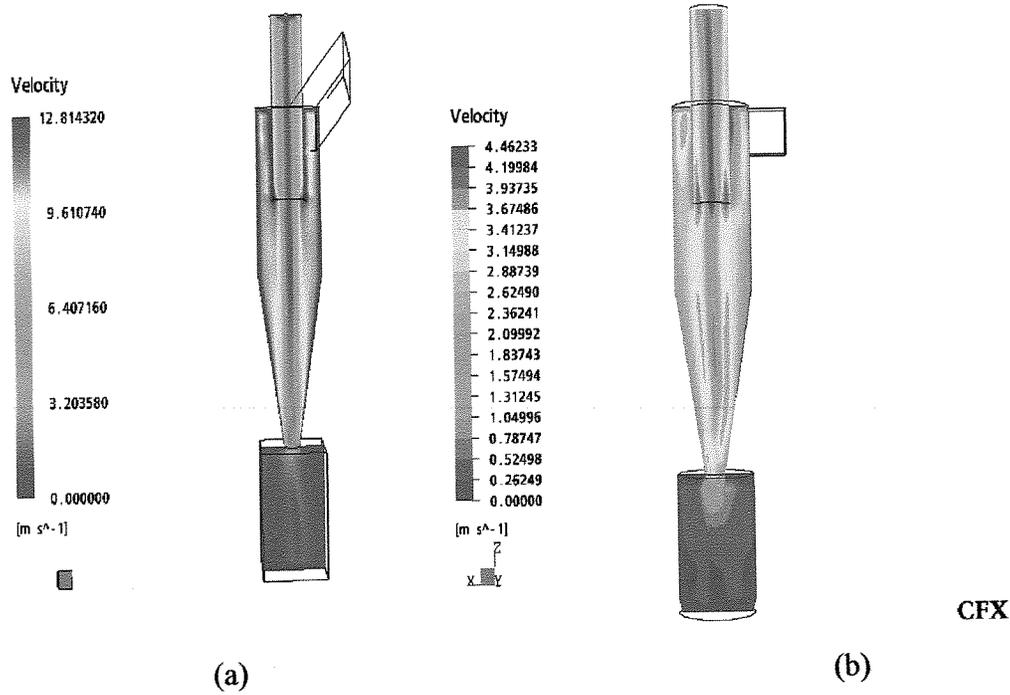


Figura 6.26: Mapeamento do campo de velocidade total para as soluções numéricas: (a) entrada inclinada (b) Peres (2002), ambas para $v_0 = 2,75$ m/s.

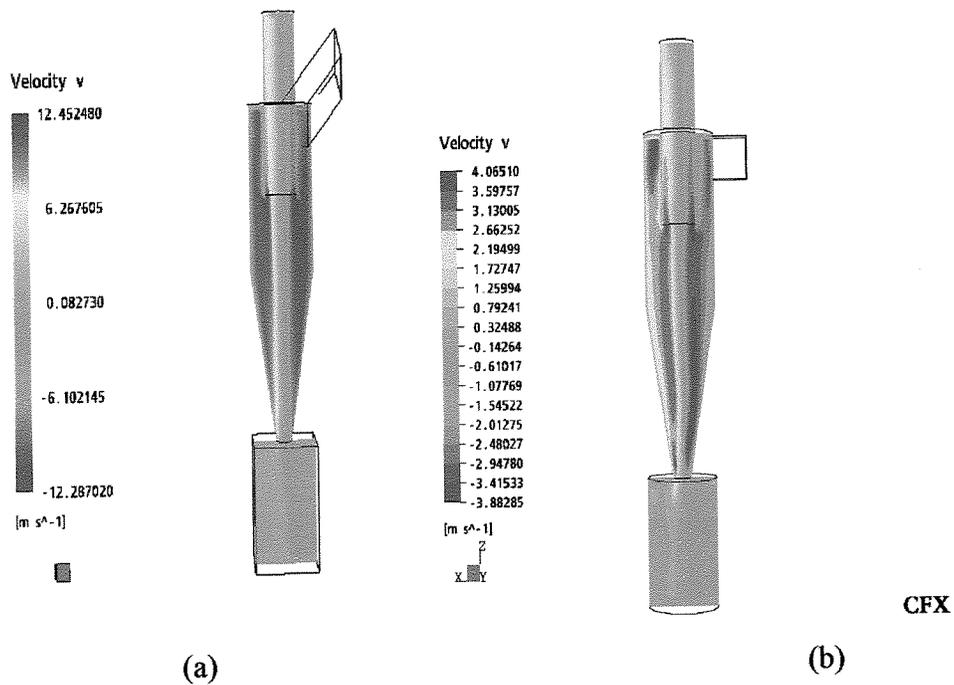


Figura 6.27: Mapeamento do campo de velocidade tangencial para as soluções numéricas: (a) entrada inclinada (b) Peres (2002), ambas para $v_0 = 2,75$ m/s.

As diferenças entre as Figuras 6.26 (a) e (b) são claras. As regiões de altas velocidades são maiores para o ciclone com entrada inclinada de 45° (Figura 6.26 (a)) e a reversão do escoamento não pode ser observada quando comparada com o outro ciclone (Figura 6.26 (b)). A seguir, mapas de velocidade tangencial estão representados na Figura 6.27.

Pode ser visto, pela análise da Figura 6.27, o fenômeno de preservação da alta vorticidade. Entretanto, para o ciclone com entrada inclinada, as altas velocidades tangenciais podem ser vistas mais próximas às paredes e ao longo de uma grande região, enquanto para o modelo convencional (Figura 6.27 (B)), as regiões de alta velocidade não se mostram tão próximas às paredes, e tão pouco são tão longas como as observadas no caso da Figura 6.27 (A).

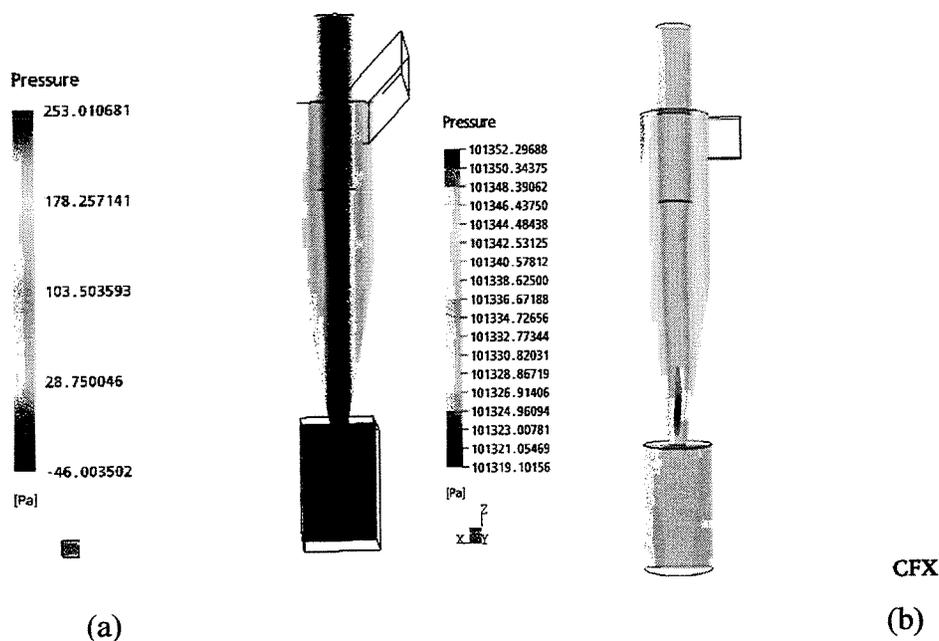


Figura 6.28: Mapeamento do campo de pressão para as soluções numéricas: (a) entrada inclinada (b) Peres (2002), ambas para $v_0 = 2,75$ m/s.

Na Figura 6.28, mapas de pressão mostram uma grande região de baixa pressão próximo ao eixo de simetria do ciclone. Ainda, pode ser observado que ambos os ciclones apresentam, praticamente, a mesma queda de pressão.

Para as velocidades de entrada do ar de 7,75 m/s e 15,2 m/s, perfis similares foram obtidos, não sendo necessária a apresentação de seus mapas de contorno.

Verificou-se que inclinar a seção de entrada 45^0 em relação ao corpo do equipamento representa uma alternativa considerável no que se refere a aumentar os picos de velocidade sem aumentar a queda de pressão no interior do equipamento (aqui, a análise da perda de carga foi feita qualitativamente, através da Figura 6.28). Serão apresentados no Capítulo 08 estudos sobre a influência desta modificação geométrica no escoamento bifásico.

Este trabalho gerou um artigo que foi apresentado e publicado nos anais do XXIV CILAMCE 2003 (XXIV Congresso Ibero-Latino-Americano em Mecânica Computacional Aplicada à Engenharia). A versão final do artigo encontra-se no Anexo 1 desta tese.

6.4.2.2- Inclinação de 30^0 na Seção de Entrada do Ciclone Descrito por Patterson e Munz (1996)

Tomando como base os resultados obtidos com a inclinação em 45^0 na seção de entrada do ciclone descrito por Patterson e Munz (1996), anteriormente estudado, propôs-se realizar o mesmo estudo, porém, reduzindo a inclinação da seção de entrada para 30^0 . O objetivo é verificar os efeitos do ângulo de inclinação sobre as características fluidodinâmicas do escoamento do gás no interior do ciclone para um ângulo inferior àquele de 45^0 anteriormente estudado.

Modificou-se a geometria da seção de entrada do caso Patterson e Munz (1996), inclinando-a de 30^0 para cima em relação ao corpo do ciclone (aplicando-se a mesma técnica da inclinação de 45^0 , previamente estudada).

Várias malhas foram construídas, com números variados de células, usando o código computacional ICEM CFD HEXA. A malha que reuniu as melhores especificações (esforço computacional compatível, convergência e resultados) para o estudo do escoamento gasoso neste ciclone possui 53800 células hexaédricas, sendo, então, a malha usada em todos os experimentos numéricos desta fase da pesquisa. A Figura 6.29, a seguir, apresenta as malhas numéricas estudadas.

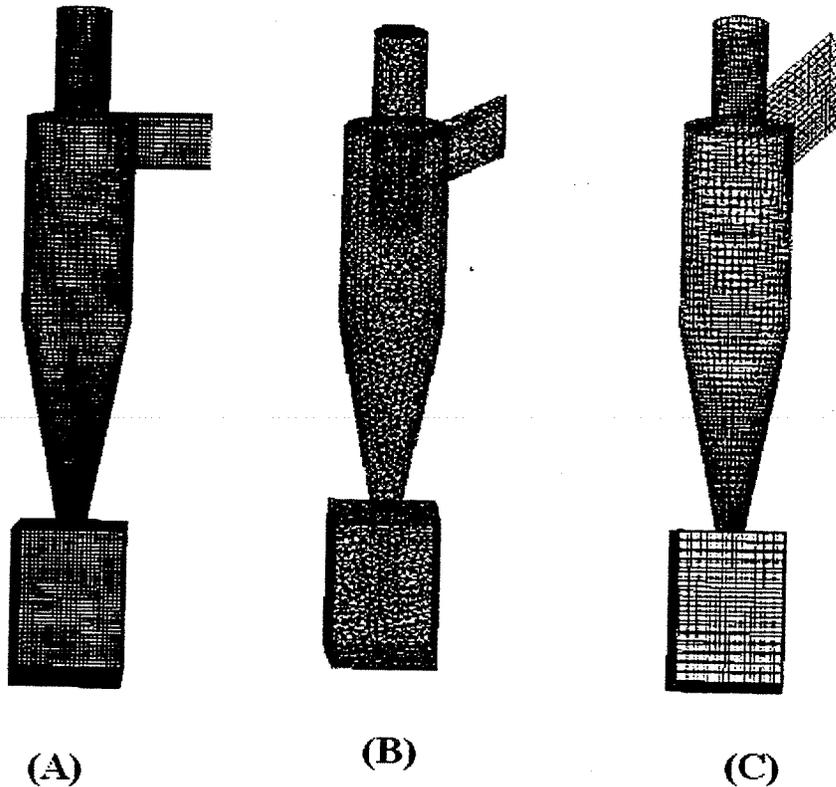


Figura 6.29: Malhas numéricas dos ciclones estudados: (A) entrada tangencial normal; (B) entrada inclinada em 30°; (C) entrada inclinada em 45°.

Os experimentos numéricos foram realizados utilizando o código computacional CFX 5.6. O algoritmo de acoplamento pressão velocidade SIMPLEC (SIMPLE Consistente) e o esquema de interpolação UPWIND de ordem superior foram utilizados em todos os experimentos numéricos.

As simulações foram realizadas em regime transiente, adotando-se cinco iterações por passo de tempo, sendo tais passos de tempo de $5 \cdot 10^{-3}$ s e um tempo total de simulação de 12 s. Estas etapas foram cumpridas com o modelo de turbulência RSM.

Este estudo, conduzido para o escoamento em fase gasosa, utilizou apenas a velocidade de entrada de 2,75 m/s, (conforme os trabalhos de Patterson e Munz, 1996), isso porque no estudo do ciclone inclinado de 45° esta condição de entrada apresentou os melhores resultados quanto ao incremento da velocidade tangencial.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de mais uma condição de inclinação de entrada do ciclone estudado. Assim sendo, foi feita uma comparação entre os resultados obtidos com uma entrada tangencial convencional e as entradas inclinadas

propostas (30° e 45°). Os dados experimentais tomados como base de comparação foram os encontrados na literatura (Patterson e Munz, 1996), e também se fez uso de dados de simulações numéricas disponíveis para algumas das condições de entrada deste estudo de caso, obtidos de Peres (2002)), ambos fazendo uso da entrada tangencial convencional no ciclone.

6.4.2.2.1- Resultados para o Escoamento do Gás

A Figura 6.30, a seguir, apresenta a distribuição da velocidade tangencial, tanto para o ciclone inclinado de 30° para o caso em estudo quanto à comparação com os perfis experimentais (Patterson e Munz, 1996) e do ciclone inclinado de 45° estudado anteriormente. Todas as informações foram obtidas numa posição do ciclone referente à altura de 0,12 m a partir do topo da parte cilíndrica do ciclone.

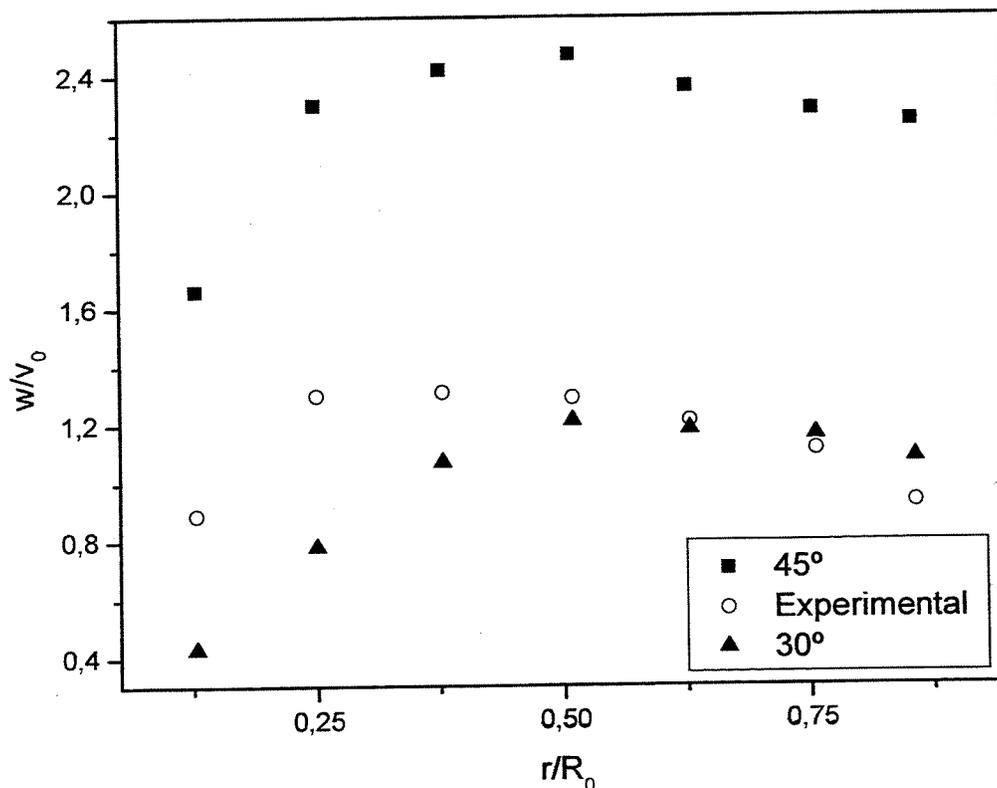


Figura 6.30: Distribuição da velocidade tangencial, normalizada, no ciclone ($v_0 = 2,75$ m/s).

Os dados obtidos através do modelo de turbulência RSM, representando os perfis de distribuição radial das velocidades axial e tangencial no ciclone, foram comparados com

dados experimentais de Patterson e Munz (1996). Como visto na seção anterior, a inclinação de 45° da seção de entrada, em relação ao corpo do ciclone, causou o aumento dos valores de velocidade tangencial quando comparados com a entrada tangencial usual, representada nos trabalhos de Patterson e Munz (1996) e Peres (2002)). Este aumento pode ser verificado principalmente no caso das menores velocidades de entrada do ar ($v_0 = 2,75 \text{ m/s}$ e $v_0 = 7,75 \text{ m/s}$). Uma comparação entre os ciclones com entrada normal e com a entrada inclinada de 30° , revela que não houve alteração significativa entre os perfis de velocidade, mostrando que, diferentemente da angulação de 45° , tal angulação de 30° não causa um impacto positivo na avaliação dos perfis de velocidades.

Os perfis de distribuição radial da velocidade tangencial para o caso em que a velocidade do ar de entrada é de $2,75 \text{ m/s}$, apresentados na Figura 6.21, permitem observar maiores velocidades de giro, as quais chegam a ser equivalente ao dobro dos valores obtidos experimentalmente por Patterson e Munz (1996), sem o uso da inclinação de 45° . Tomando como base a velocidade do ar de entrada de $2,75 \text{ m/s}$, pode-se apresentar uma melhor visualização dos resultados dos perfis de velocidade através dos mapas de velocidade mostrados na Figura 6.31. Mapas de velocidade tangencial estão representados na Figuras 6.32, enquanto a Figura 6.33 apresenta o mapeamento da pressão.

A análise das Figuras 6.31 (A e B) mostra que as diferenças entre as duas inclinações estudadas residem no fato de que as regiões de altas velocidades são maiores para o ciclone com entrada inclinada de 45° (Figura 6.31 (B)) e a reversão do escoamento não pode ser observada quando comparada com o ciclone de 30° (Figura 6.31 (A)).

Pela análise das Figuras 6.32 (A e B), pode ser visto em ambos os casos fenômeno de preservação da alta vorticidade. Entretanto, para o ciclone com entrada inclinada de 45° , as altas velocidades tangenciais podem ser vistas mais próximas às paredes e ao longo de uma grande região, enquanto para a entrada com 30° , as regiões de alta velocidade não se mostram tão próximas às paredes, e tão pouco são tão longas como as observadas no caso da Figura 6.32 (A).

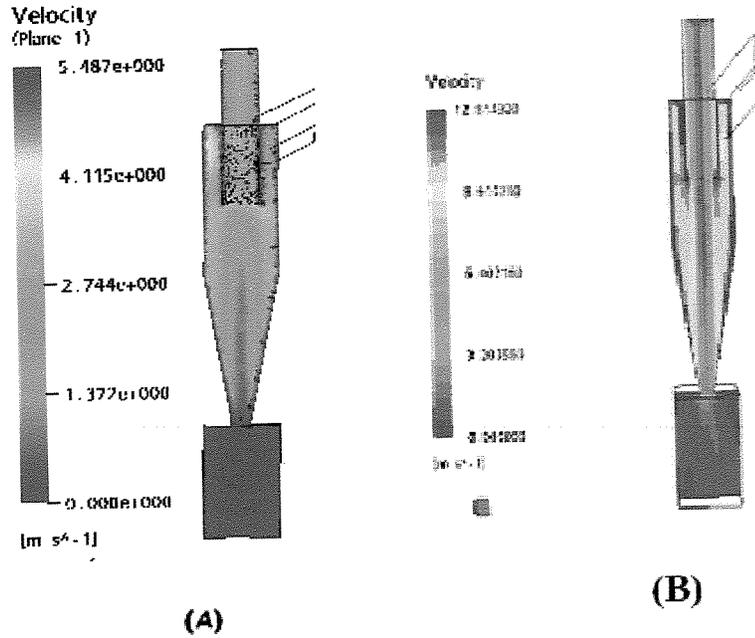


Figura 6.31: Mapeamento do campo de velocidade total para as soluções numéricas: (A) entrada inclinada de 30° (B) entrada inclinada de 45°, ambas para $v_0 = 2,75$ m/s.

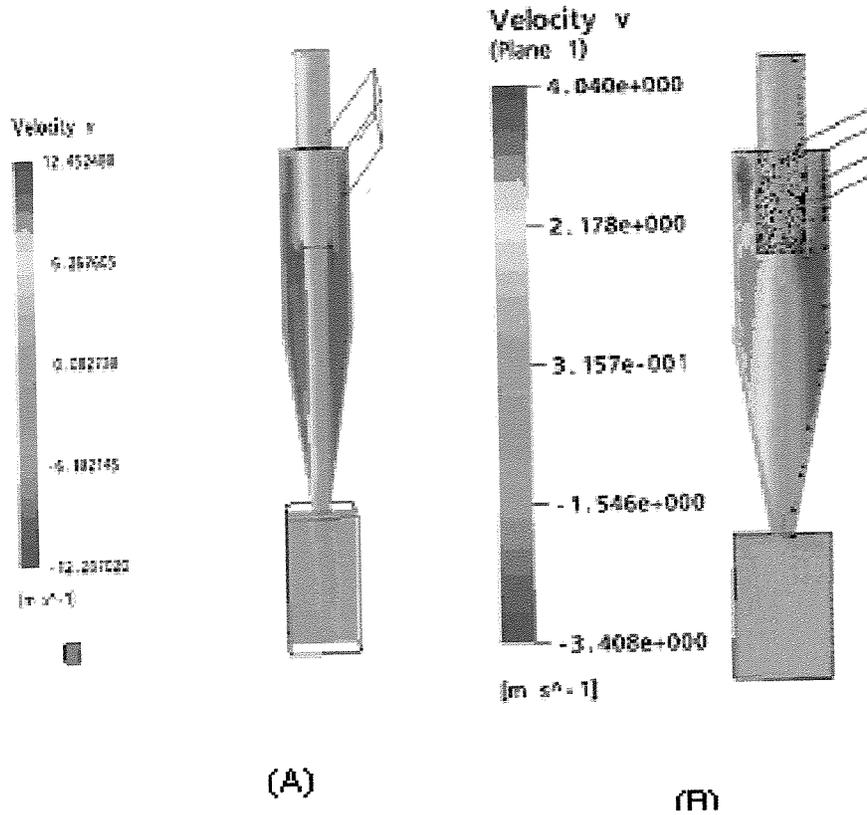


Figura 6.32: Mapeamento do campo de velocidade tangencial: entrada inclinada de (A) 30° (B) 45°, ambas para $v_0 = 2,75$ m/s.

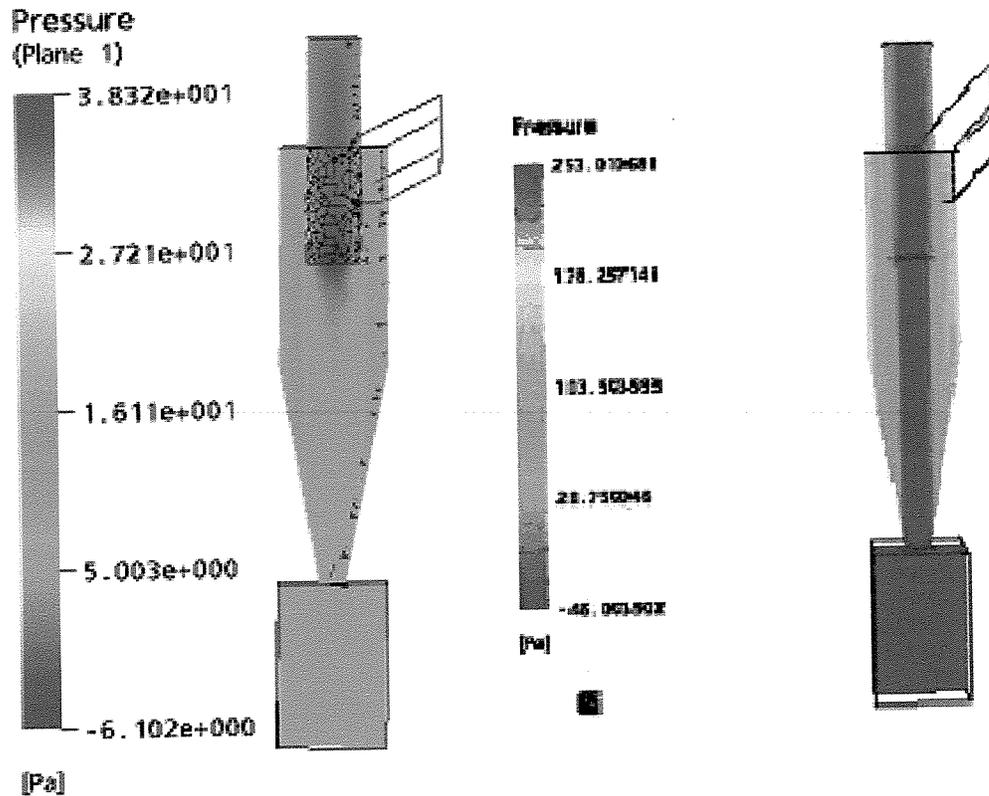


Figura 6.33: Mapeamento do campo de pressão: entrada inclinada de (a) 30° (b) 45°, ambas para $v = 2,75$ m/s.

Na Figura 6.33, os mapas de pressão mostram uma grande região de baixa pressão próxima ao eixo de simetria do ciclone. Ainda, pode ser observado que ambos os ciclones apresentam, praticamente, a mesma queda de pressão.

Verificou-se que os resultados para o escoamento do gás, com a inclinação da seção de entrada de 30°, não apresentaram melhoras significativas em relação aos obtidos para a entrada convencional.

Dentre as duas inclinações estudadas, os melhores resultados foram alcançados com a inclinação de 45° em relação ao corpo do equipamento, que representa, para o caso de Patterson e Munz (1996), uma alternativa considerável no que se refere a aumentar os picos de velocidade sem aumentar a queda de pressão no interior do equipamento.

É necessário, porém, avaliar o impacto destas alterações geométricas em sistemas envolvendo o escoamento gás-sólido sobre os parâmetros de queda de pressão e eficiência de coleta do mesmo. Estas propriedades são apresentadas nos próximos capítulos.

CAPÍTULO 07

RESULTADOS E DISCUSSÕES DO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO EM CICLONES

“Que os nossos esforços desafiem as impossibilidades. Lembrai-vos de que as grandes conquistas da história foram fruto do que parecia impossível.”

(Charles Chaplin)

7.1 – Apresentação

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações envolvendo o escoamento bifásico (gás-sólido) em ciclones. A abordagem é feita em três partes. Na primeira parte são apresentados os resultados da avaliação do escoamento bifásico para o estudo de caso de Yuu *et al.*(1978). Na segunda parte são apresentados os resultados do estudo para a simulação do escoamento bifásico do estudo de caso de Patterson e Munz (1989), com o diâmetro do finder de 50,8 mm. Na terceira parte, faz-se uma análise da trajetória das partículas no interior destes equipamentos.

Os modelos utilizados, as equações de discretização, os esquemas de interpolação para as variáveis nas faces dos volumes de controle, as técnicas numéricas para se garantir estabilidade e convergência das soluções numéricas e os critérios de convergência foram apresentados nos Capítulos 04 e 05.

7.2- A Abordagem Euleriana-Euleriana

Os trabalhos envolvendo as simulações numéricas desta parte da tese fazem uso da abordagem Euleriana-Euleriana, na qual os efeitos da fase particulada sobre a fase gasosa são levados em consideração, fazendo parte do escopo da fluidodinâmica do escoamento. Nesta pesquisa, a concepção do modelo Euleriano-Euleriano visa interpretar os efeitos da presença da fase sólida sobre a fase gasosa, para tanto são avaliados três aspectos principais:

- Perfis de Distribuição de velocidades;
- Queda de Pressão;
- Eficiência de Coleta.

O código CFX 5.5.1 foi utilizado para simulação em regime transiente, com um tempo de simulação de 12 s, passo de tempo de $5 \cdot 10^{-3}$ s e 4 iterações por passo de tempo. As condições de contorno englobam velocidades de entrada iguais para ambas as fases; perfis de deslizamento “free slip” para a fase sólida e “no slip” para a fase gasosa na parede; condição de saída tipo “opening” com pressão relativa nula como parâmetro. A fase particulada apresenta baixa viscosidade, associada a sua baixa fração volumétrica (caracterizando um escoamento diluído), comporta-se como um contínuo, sendo caracterizada por um diâmetro médio das partículas. No caso de aplicação do modelo de turbulência LES, as viscosidades das fases sólida e gasosa são variáveis (vide anexo 2 desta tese).

7.3 – Estudo de Caso 04: Yuu *et al.*(1978)

A Tabela 7.1 apresenta as características do estudo de caso Yuu *et al.*(1978) para o escoamento bifásico.

Tabela 7.1: Características do Estudo de Caso 04 para o escoamento Bifásico.

PROPRIEDADES		Yuu <i>et al.</i> (1978)
Condições Operacionais	Velocidade do Gás na entrada (m/s)	9,80
	Velocidade do Sólido na entrada (m/s)	9,80
	Vazão de Gás (m ³ /s)	5,93.10 ⁻²
	Vazão de Sólidos (m ³ /h)	3,18211.10 ⁻⁶
Fase Sólida	Material	Pó de PVC
	Razão de Carga (g/m ³)	70,8
	Diâmetro médio da Partícula (μ m)	163
	Massa Específica (kg/m ³)	1330
	Fração Volumétrica de Sólidos na Entrada	5,32302.10 ⁻⁵
Fase Gasosa	Material	Ar
	Massa Específica (kg/m ³)	1,142
	Viscosidade (kg/m.s)	1,85.10 ⁻⁵

Os dados da simulação a ser apresentada são os seguintes:

- ◆ Modelos de viscosidade: RSM e LES;
- ◆ Condições de deslizamento (parede): ar (no slip) e sólido (free slip);
- ◆ Critério de convergência de massa (continuidade): 10⁻⁵;
- ◆ Condição de parede na superfície de saída dos sólidos.

O esforço computacional para se obter uma solução numérica estável neste caso foi maior do que aquele observado para o caso monofásico. Este maior tempo computacional para a simulação bifásica está, provavelmente, associado ao amortecimento de uma solução numérica perceptível devido à presença da fase sólida no escoamento.

Este estudo de caso foi conduzido, inicialmente, utilizando o modelo de turbulência RSM, com a malha numérica de 200000 elementos, aproximadamente, gerada no ICFM CFD HEXA. Esta malha é resultante do refinamento da malha de 40872 elementos,

utilizada nos casos 02 e 03, descritos no capítulo 06. Este refinamento foi feito em função de se trabalhar neste estudo de Caso 04 também com o modelo LES, cuja exigência é o uso de uma malha bem refinada.

Os resultados iniciais estão representados na Figura 7.1.

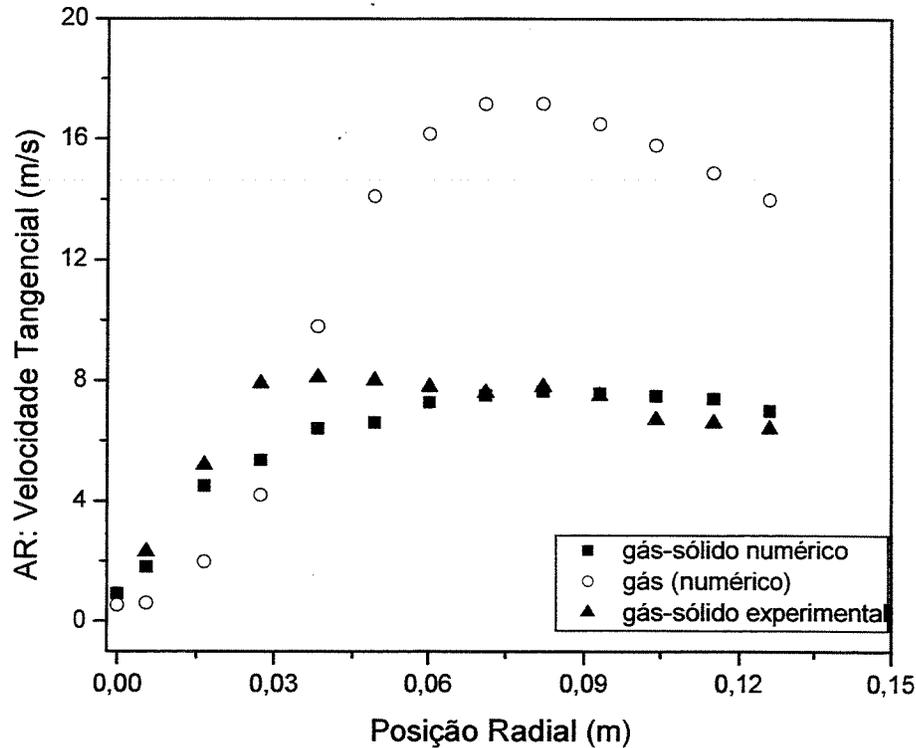


Figura 7.1: Perfil de velocidade tangencial do gás na presença de sólidos para o caso 04, usando o modelo RSM.

Percebe-se a influência da presença da fase particulada na distribuição da velocidade tangencial do gás (para a posição de $z = 0,19$ m, pouco abaixo da seção de entrada do tubo de saída do gás no ciclone). A análise da Figura 7.1 evidencia a atenuação do escoamento, ou seja, a presença da fase sólida causa um decréscimo da velocidade do gás, mantendo o perfil de velocidade. Verifica-se o deslocamento do pico de velocidade tangencial em direção ao eixo de simetria do ciclone, comportamento também observado por Meier (1998). Segundo também observou Peres (2002), à medida que se aumenta a razão de alimentação de sólidos diminui-se a componente tangencial da velocidade do gás. Patterson e Munz (1996) observaram o mesmo fenômeno, relacionando-o ao aumento da

concentração de sólidos junto às paredes do ciclone. Observa-se, ainda, através da Figura 7.1, uma concordância muito boa entre os resultados numéricos e experimentais para este estudo de caso.

Um estudo adicional foi realizado com o intuito de verificar se a pseudo-viscosidade da fase sólida exerce influência no perfil de distribuição da velocidade tangencial do gás neste escoamento gás-sólido. Yuu *et al.*(1978) não especificou o valor da pseudo-viscosidade do material sólido (pó de PVC) utilizado (entenda-se que, em princípio, o sólido não possui viscosidade pois não segue a lei da viscosidade de Newton e sim a lei de Hook para a mecânica do corpo sólido).

Buscou-se um parâmetro para esta grandeza na literatura, com valores de referência para pseudo-viscosidade de sólidos sugeriam trabalhar com o valor de 0,05 kg/m.s. Este estudo se mostrou necessário para fechar algumas lacunas advindas do fato de não se ter encontrado, na literatura, um valor específico para esta grandeza. Considerando o fato de que, nesta tese, quando trabalhou-se com o modelo LES fez-se uso de uma função para descrever o comportamento desta pseudo-viscosidade (tanto do sólido quanto do gás), mostrando-se necessária a verificação da influência deste parâmetro. Os valores utilizados neste estudo foram: 0,05 kg/m.s (valor dentro da faixa encontrada na literatura para alguns sólidos) e 1.10^{-8} kg/m.s (admitindo um escoamento praticamente invíscido). Assim, esperava-se que, dentro desta faixa, as dúvidas eventuais pudessem ser sanadas. Uma observação pertinente é que o modelo LES fornece apenas a correção da viscosidade da fase gasosa.

Os ensaios foram realizados com o modelo de turbulência RSM, utilizando a malha refinada de aproximadamente 200000 elementos.

A Figura 7.2, a seguir, apresenta os resultados obtidos neste estudo para o caso 04 em questão.

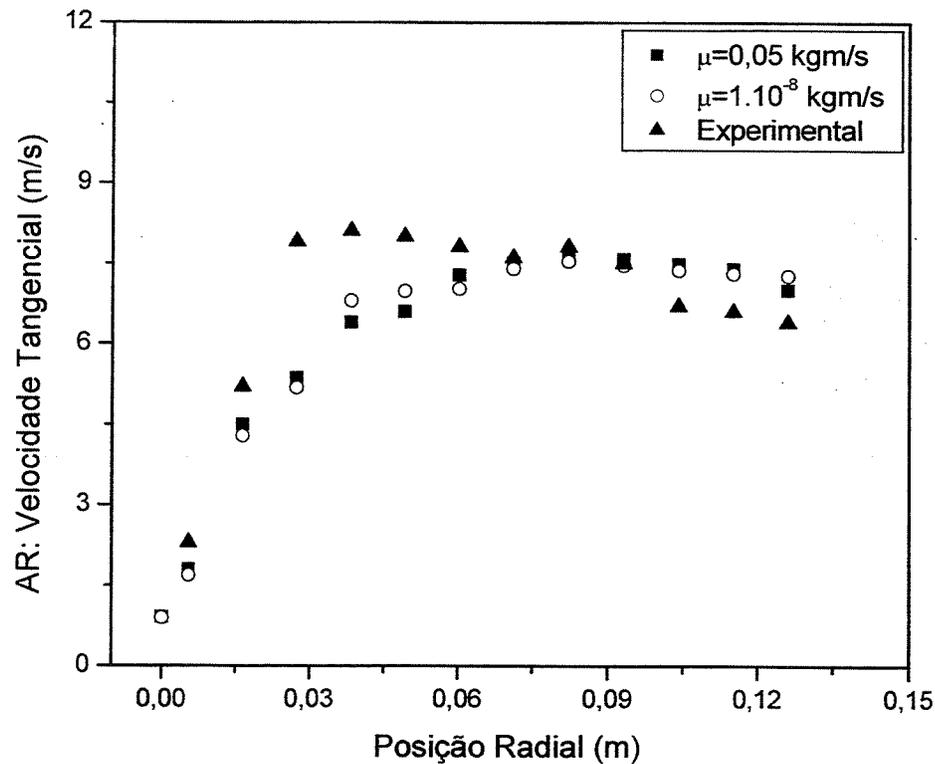


Figura 7.2: Perfil de velocidade tangencial do gás, na presença de sólidos, para o caso 04: avaliação da influência da viscosidade da fase sólida.

Com o intuito de aprofundar ainda o estudo fluidodinâmico do caso 04, foram realizadas simulações utilizando outro modelo de turbulência, o modelo LES, para a simulação com as mesmas características da realizada com o modelo RSM. Para isso, conforme dito anteriormente, primeiro realizou-se o refino da malha numérica dos casos 02 e 03, que passou de 40872 elementos para 200000 aproximadamente (o uso de uma malha bem refinada é uma exigência do modelo LES). Então, mantidas todas as demais condições (iniciais e de contorno) constantes, realizou-se o experimento numérico. A Figura 7.3 a seguir apresenta os resultados obtidos para o perfil de velocidade tangencial do gás em presença de sólidos utilizando o modelo LES.

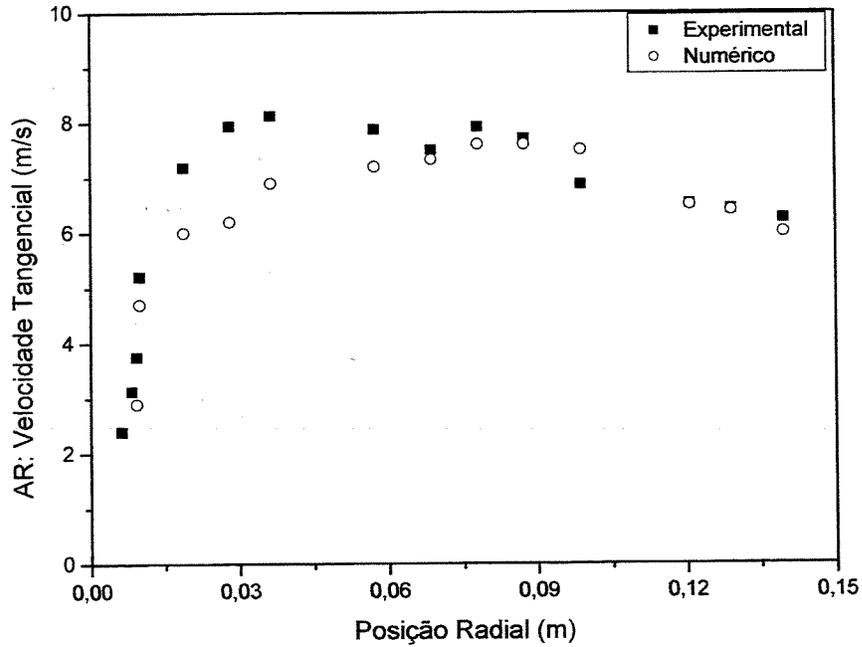


Figura 7.3: Perfil de velocidade tangencial para a fase gasosa na presença da fase sólida para o caso 04, utilizando modelo LES.

Conforme se verifica nesta figura, os dados obtidos com o modelo LES mostraram-se bem próximos aos dados experimentais, tal como ocorreu com o modelo RSM, de forma que se tem uma boa concordância entre os resultados, corroborando também o modelo proposto (LES). A Figura 7.4, apresentada na página a seguir, mostra os resultados obtidos através de um estudo comparativo entre os resultados gerados no estudo de caso 04.

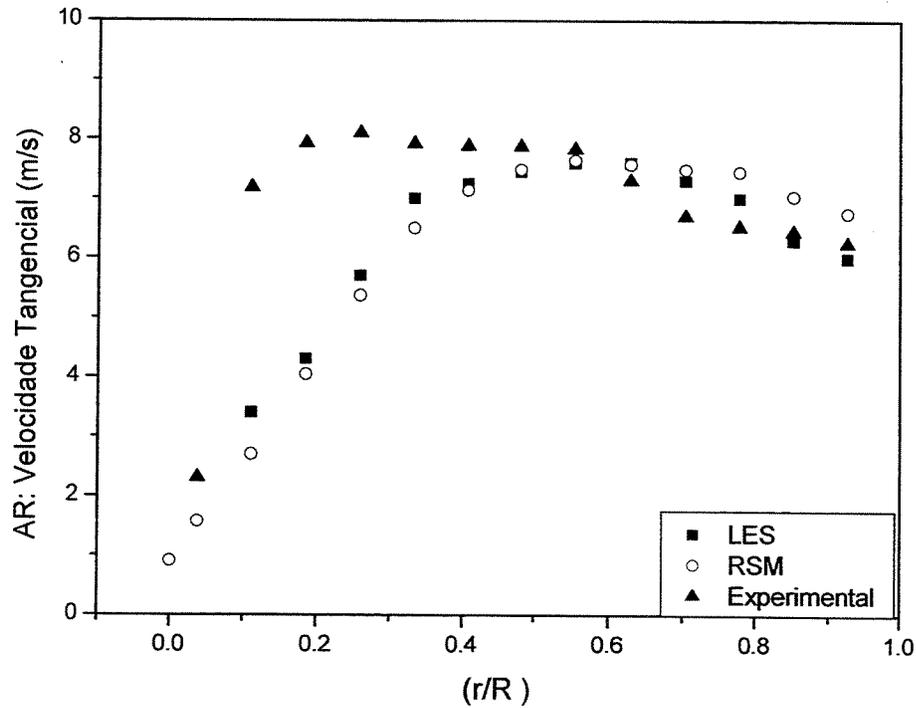


Figura 7.4: Perfil de velocidade tangencial para a fase gasosa na presença da fase sólida para o caso 04, utilizando os modelos RSM e LES em malha refinada.

A partir dos resultados expostos na Figura 7.4, percebe-se que os resultados propiciados pelo modelo LES são muito próximos dos resultados obtidos com o modelo RSM, e ambos apresentam desvios significativos frente aos dados experimentais disponíveis para o caso 04.

A Figura 7.5, apresentada na página a seguir, apresenta um comparativo entre todos os perfis de velocidade tangencial para o estudo do escoamento do gás, com e sem partículas sólidas.

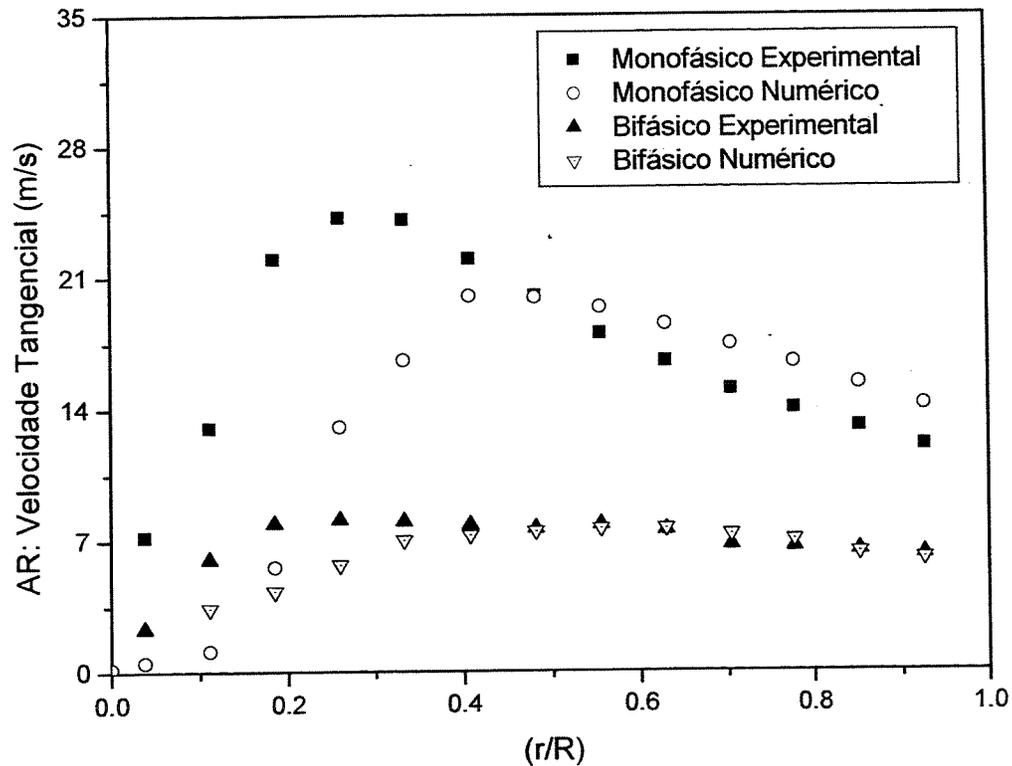


Figura 7.5: Perfis de velocidade tangencial para a fase gasosa (escoamento monofásico e bifásico), utilizando modelo RSM, para o caso 04.

Com o intuito de melhor ilustrar a influência da presença da fase sólida sobre a fase gasosa do escoamento no interior de um ciclone, apresenta-se a seguir a Figura 7.6, com o mapeamento do campo de velocidade tangencial, para a fase gasosa em presença de sólidos, com os dois modelos de turbulência avaliados, enquanto a Figura 7.7 apresenta o mapeamento do campo de velocidade tangencial da fase gasosa para os escoamentos monofásico e bifásico.

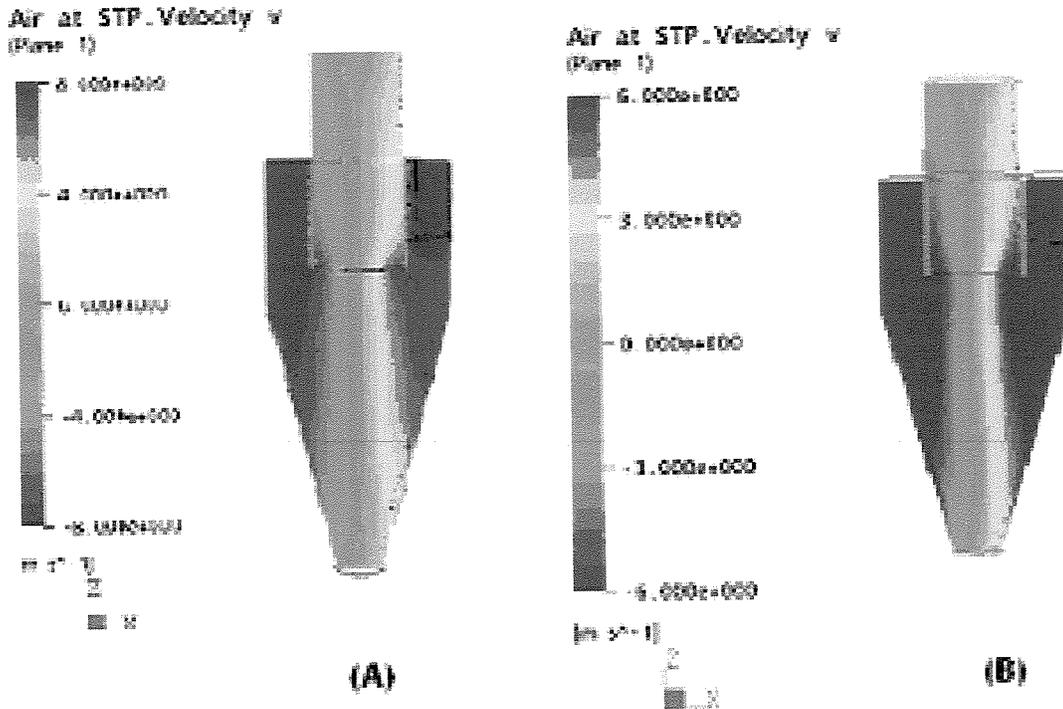


Figura 7.6: Mapeamento dos campos de velocidade tangencial da fase gasosa em presença da fase sólida para o caso 04: (A) Modelo RSM; (B) Modelo LES.

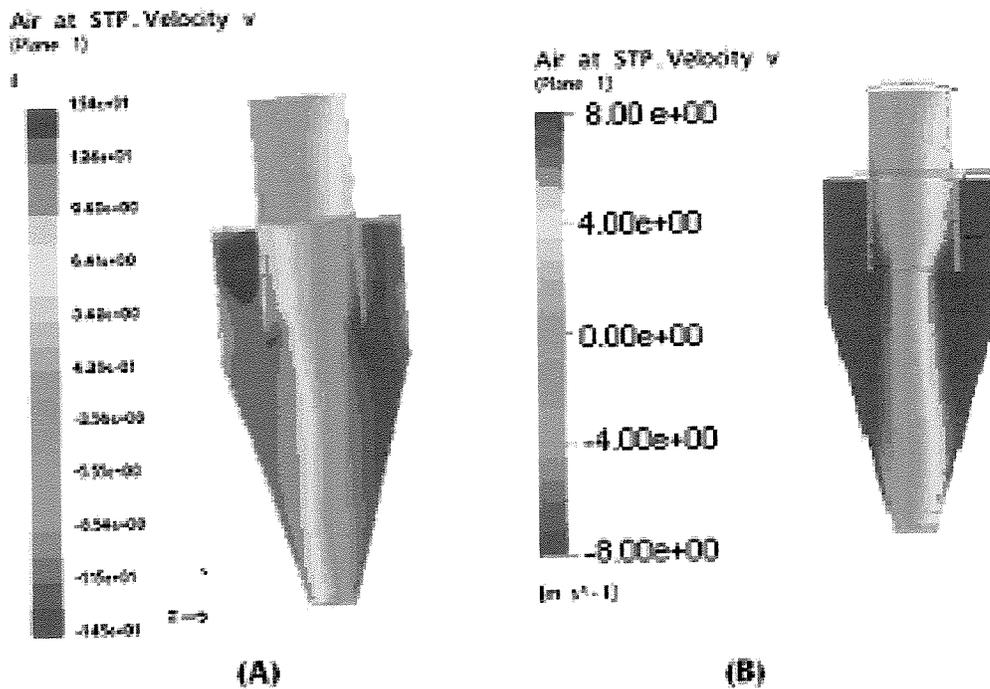


Figura 7.7: Mapeamento dos campos de velocidade tangencial da fase gasosa para o caso 04: (A) Escoamento monofásico; (B) Escoamento Bifásico.

Percebe-se que os dois modelos estudados produziram os mesmos contornos para a velocidade tangencial do gás na presença de sólidos para este modelo de ciclone estudado. Esta característica foi observada também nos resultados obtidos para as demais grandezas estudadas. Por este motivo, os mapas de contorno a serem apresentados para o estudo de Caso 04 (Figuras 7.7 a 7.9) serão referidos ao modelo RSM.

Verifica-se que não ocorre a preservação do escoamento giratório ao longo de todo o equipamento para o caso bifásico, conforme verificado para o escoamento da fase gasosa apenas. A presença da fase particulada causa ainda uma diminuição no pico velocidade tangencial e o deslocamento deste pico de velocidade na direção do eixo de simetria, confirmando o que se verificara nas Figuras de 7.1 a 7.5. Ainda é possível perceber que a presença da carga sólida também é responsável pela maior rapidez na reversão do escoamento do gás. Meier (1998) e Peres (2002) concluíram que a reversão do escoamento do gás se dá mais rapidamente à medida que se aumenta a concentração de sólidos.

A seguir, a Figura 7.8 apresenta o mapeamento do campo de velocidade axial para o escoamento bifásico. Figura 7.9 apresenta o mapeamento do campo de pressão para os escoamentos monofásico e bifásico.

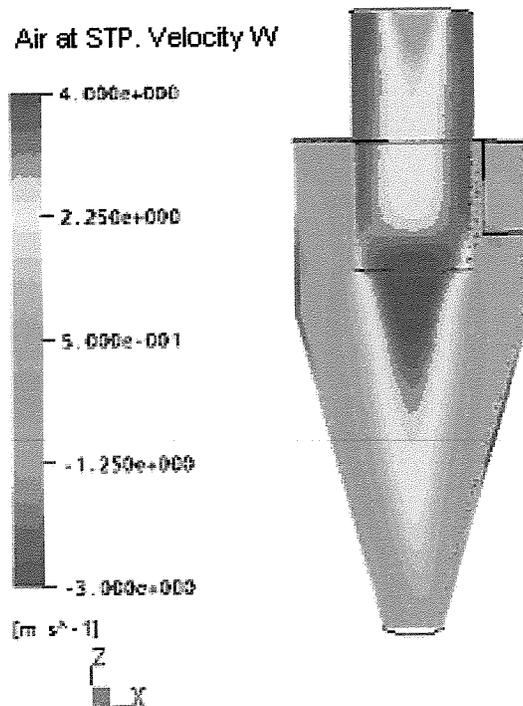


Figura 7.8: Mapeamento dos campos de velocidade axial da fase gasosa em presença da fase particulada para o caso 04.

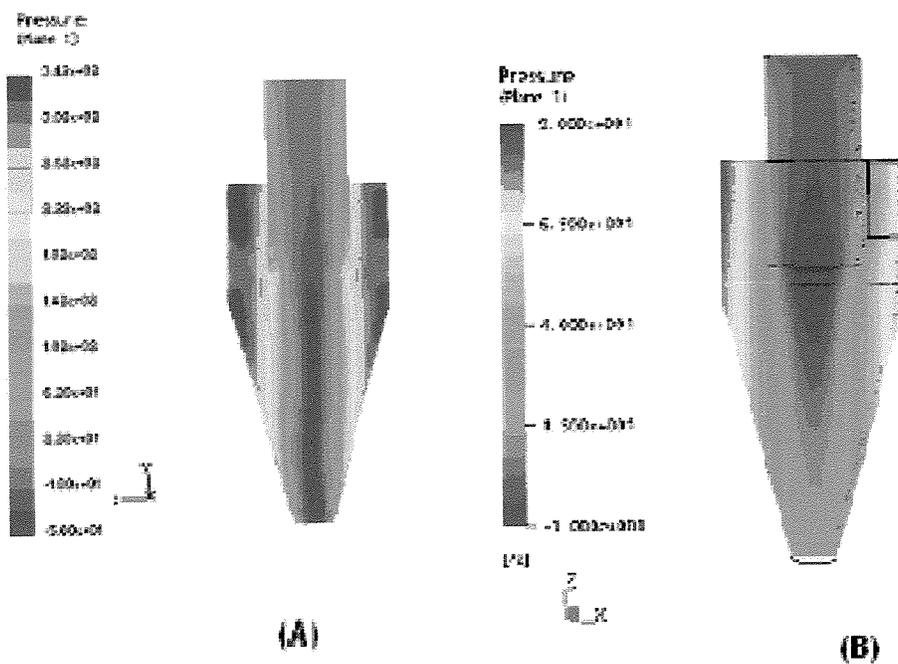


Figura 7.9: Mapeamento dos campos de pressão para o caso 04: (A) Escoamento Monofásico; (B) Escoamento Bifásico.

Na Figura 7.8, a região de máxima velocidade axial apresenta a influência da atenuação do escoamento giratório, concentrando-se no tubo de saída do gás e apresentando aí seus maiores valores, difundindo-se em direção às paredes. Esta figura também confirma a observação de que a reversão do escoamento se dá mais rapidamente com a presença da fase particulada.

Pela inspeção destas figuras, percebe-se a grande relação entre a região de baixa pressão (tom escuro na Figura 7.9 (A)) e a reversão do escoamento. No escoamento monofásico esta região se estende ao longo de todo o ciclone, caracterizando o fenômeno de reversão do escoamento no fundo da parte cônica do ciclone. Já no escoamento bifásico a região de baixa pressão tende a se localizar na região interna ao tubo de saída do gás (tom escuro na Figura 7.9 (B)). Conforme descrito anteriormente, esta é uma região de velocidade máxima. Este fenômeno foi observado experimentalmente por Yuu *et al.*(1978). Meier (1998) complementa esta observação, salientando que a maior dispersão da região de velocidade máxima em direção à base do ciclone (vide Figura 7.6 (B)), associada à diminuição da velocidade máxima quando da presença da fase particulada (vide Figuras 7.1 a 7.4) sejam responsáveis pela redução da queda de pressão devido à presença da fase particulada. Observa-se, ainda, uma maior uniformidade de pressão nas regiões próximas à parede externa do ciclone no caso do escoamento bifásico. Yuu *et al.*(1978) concluíram que a principal razão para a redução da queda de pressão é o aumento do atrito devido ao movimento das partículas rumo às paredes externas do ciclone, como também ao decréscimo da velocidade tangencial.

A Figura 7.10 apresenta o mapeamento dos campos da fração volumétrica correspondente à fase particulada. E a Figura 7.11 traz o mapeamento do perfil de velocidade axial para a fase sólida.

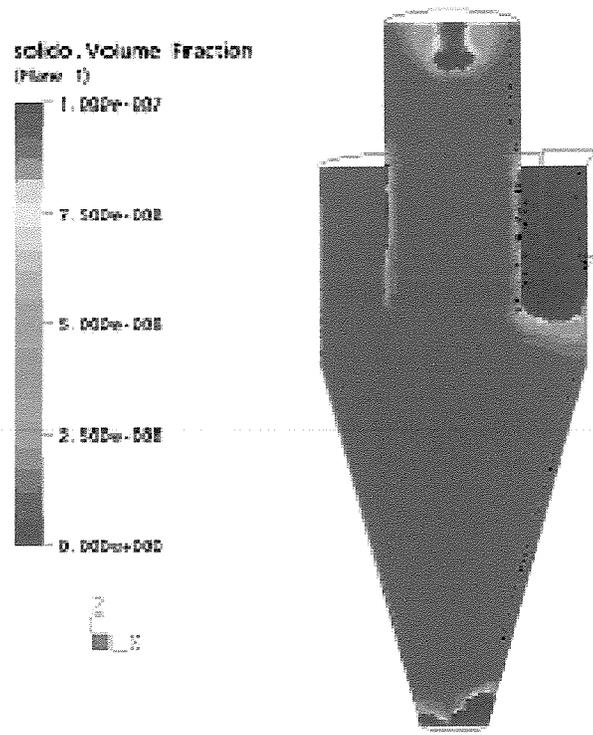


Figura 7.10: Mapeamento dos campos de fração volumétrica para a fase sólida – Caso 04.

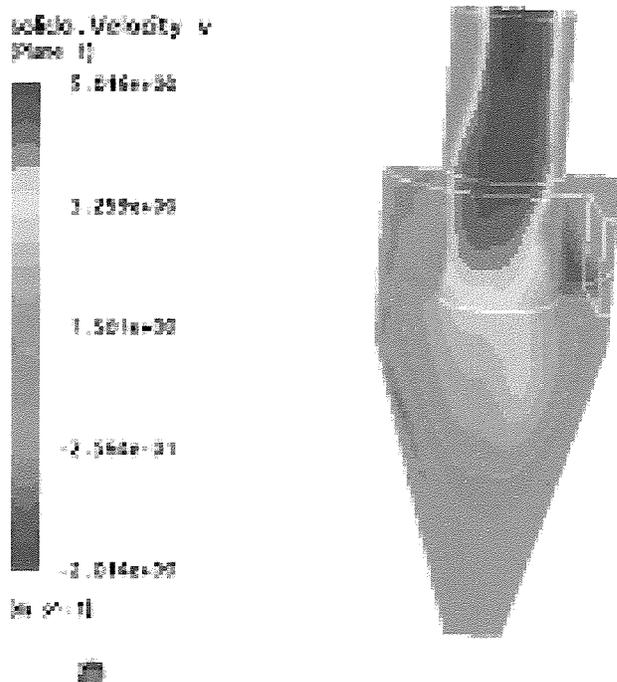


Figura 7.11: Mapeamento dos campos de velocidade axial da fase sólida- Caso 04.

Por ser o escoamento altamente diluído, a concepção da Figura 7.10 só foi possível para valores de frações volumétricas extremamente baixas. O comportamento da fase particulada é função da força de arraste do escoamento do gás (conforme exposto no capítulo 01). Este fenômeno tem uma influência maior em partículas de pequeno diâmetro, para as quais o arraste se acentua, fazendo com que sejam carregadas pelo fluxo ascendente do gás e, com isso, direcionadas rumo ao tubo de saída do gás. Este fato acarreta na queda de eficiência de coleta para as partículas de pequeno diâmetro. Porém, no caso atual, as partículas têm um diâmetro médio de 163 μm , que pode ser considerado “grande” quando comparado com o diâmetro médio de 10 μm usado nos trabalhos de Patterson e Munz (1989). Este fato lhes confere a característica de terem mais massa e uma maior inércia. Com isso, as partículas seriam direcionadas às paredes do ciclone e deslizariam rumo ao sistema de coleta. Para tais casos, a eficiência de coleta é maior, conforme descrito adiante.

Na Figura 7.11 se confirma o efeito da força de arraste das pequenas partículas, caracterizado pelas altas velocidades registradas no tubo de saída do gás. Analisando-se conjuntamente as Figuras 7.10 e 7.11, observa-se que o pico de concentração de sólidos ocorre próximo à região de entrada, onde a velocidade axial do sólido é menor. Com o aumento da velocidade axial dos sólidos, à medida que se adentra na parte cônica do ciclone, a concentração de sólidos vai diminuindo, de modo a se garantir a conservação da quantidade de movimento.

7.3.1- Avaliação do desempenho do ciclone para o estudo de caso 04

Segundo Meier (1998) e Peres (2002), a eficiência global de coleta de um ciclone pode ser definida como a razão entre a vazão de sólidos que sai do ciclone na região do “underflow”, ou vazão coletada, subtraído da vazão que sai pelo tubo de saída do gás, pela vazão de sólidos que entra no ciclone:

$$Efic(\%) = \left[\frac{\left(\dot{m} \right)_{underflow} - \left(\dot{m} \right)_{saida}}{\left(\dot{m} \right)_{entrada}} \right] * 100 \quad (7.1)$$

Para o caso 04 em estudo, obtiveram-se os seguintes valores :

- vazão mássica na entrada: 4,1975 g/s;
- vazão mássica na saída: 0,002047 g/s;
- vazão retida no ciclone: 4,1954 g/s.

Assim, a eficiência global de coleta para o caso 04 foi de 99,92%.

Na literatura referente a este estudo de caso (Yuu *et al.*, 1978), não foi determinada a eficiência de coleta do sistema. Para fins de corroboração, pode ser citado o trabalho de Meier (1998), que obteve eficiência quase total, ou seja, próxima dos 100% para este estudo de caso, salientando ter havido oscilações significativas durante o período transiente.

A queda de pressão fornecida foi a seguinte:

- queda de pressão para o escoamento monofásico (caso 02): 410 Pa;
- queda de pressão para o escoamento bifásico (caso 04): 180 Pa.

A redução na queda de pressão entre os escoamentos monofásico e bifásico mostrou-se acentuada, devendo-se ao efeito da presença da fase sólida no escoamento

Não estão disponíveis as informações experimentais de queda de pressão para este estudo de caso, não fornecendo, portanto, subsídios para a corroboração dos resultados simulados. Porém, um parâmetro utilizado por Yuu *et al.* (1978) para caracterizar a influência da presença da fase sólida sobre o escoamento da fase gasosa foi a razão percentual de redução da queda de pressão entre o escoamento monofásico e o escoamento bifásico (denominado α). De acordo com os resultados apresentados acima, obteve-se uma relação de $\alpha = 0,56$, ou uma redução de 44% na queda de pressão neste trabalho. Nas condições do trabalho apresentadas na Tabela 7.1, os pesquisadores encontraram valores para o parâmetro α experimental compreendidos entre 0,50-0,55, entre os escoamentos monofásico e bifásico. Este fato caracteriza uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

7.4 – Estudo de Caso 05: Patterson e Munz (1989)

A Tabela 7.2 apresenta as características do estudo de caso Patterson e Munz (1989).

Tabela 7.2: Características do Estudo de Caso 05 para o escoamento Bifásico.

PROPRIEDADES		Patterson e Munz (1989)
Condições Operacionais	Velocidade do Gás na entrada (m/s)	15,2
	Velocidade do Sólido na entrada (m/s)	15,2
	Vazão de Gás (m ³ /s)	1,9613.10 ⁻²
	Vazão de Sólidos (m ³ /h)	3,18211.10 ⁻⁶
Fase Sólida	Material	sílica
	Diâmetro da Partícula (μ m)	10
	Massa Específica (kg/m ³)	2600
	Fração Volumétrica de Sólidos na Entrada	6,13.10 ⁻⁵
Fase Gasosa	Material	Ar
	Massa Específica (kg/m ³)	1,142
	Viscosidade (kg/m.s)	1,85.10 ⁻⁵

O que se observou neste caso foi que as mesmas conclusões extraídas com relação ao escoamento bifásico do caso anterior (Yuu *et al.*, 1978) acerca das características do escoamento bifásico e da influência da presença da fase sólida sobre o escoamento da fase gasosa são também aplicáveis a este caso, o que muito nos anima, uma vez que tal fato representa a confirmação do que fora observado anteriormente com relação à fluidodinâmica do escoamento gás-sólido em ciclones. Os modelos RSM e LES (para o qual refinou-se a malha numérica usada no Caso 01, de 42696 elementos para um total aproximado de 300000 elementos) apresentaram os mesmos perfis para os resultados neste caso, ou seja, ambos os modelos foram testados com as duas malhas (refinada e não-refinada), não se obtendo diferenças significativas entre os resultados. As Figuras 7.12 e 7.13, a seguir, apresentam os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial e do perfil de pressão, respectivamente.

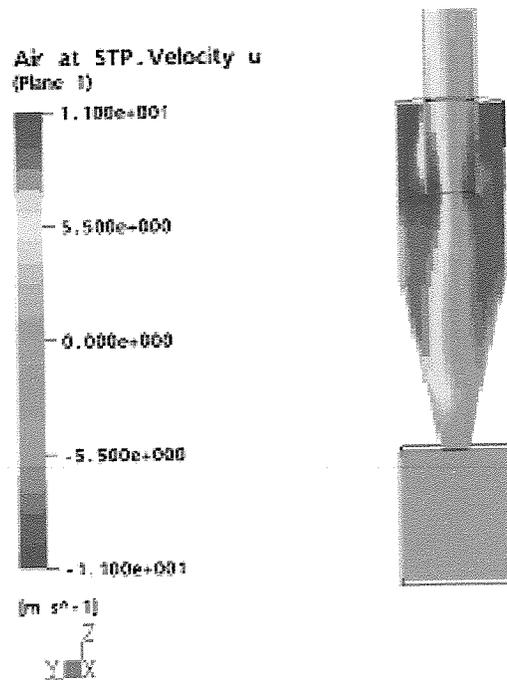


Figura 7.12: Mapeamento do campo de velocidade tangencial da fase gasosa para o caso 05. Modelo RSM.

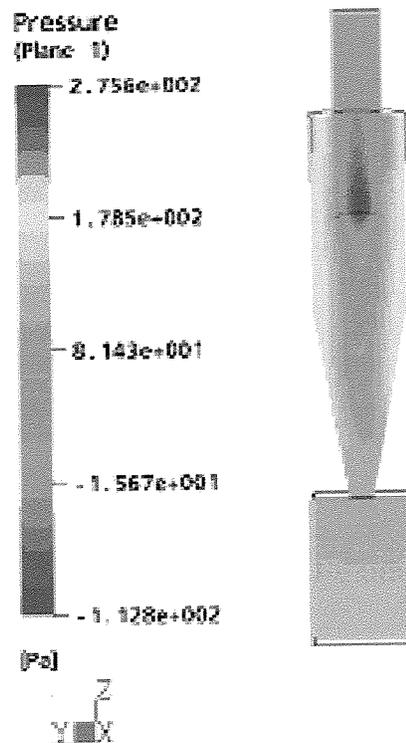


Figura 7.13: Mapeamento do campo de pressão para o caso 05 –Modelo RSM.

Os dados para os perfis de velocidade (tangencial e axial) para o estudo de caso de Patterson e Munz (1989), que é o caso 05 em estudo, em escoamento gás-sólido não estão

disponíveis em seu artigo, apresentando apenas os dados em fase gasosa. Acerca do escoamento gás-sólido, os autores trazem apenas resultados referentes aos parâmetros de eficiência do ciclone. Apesar disto, os resultados no mapeamento dos campos de velocidade e de pressão apresentados para este estudo de caso através das figuras anteriores evidenciam que o comportamento apresentado corrobora as observações experimentais apresentadas anteriormente acerca dos trabalhos de Yuu *et al.*(1978) e Peres (2002), segundo os quais a presença da fase sólida leva a uma concentração de sólidos junto às paredes do ciclone e também causa a diminuição da componente tangencial da velocidade da corrente gasosa.

A Figura 7.14 apresenta um estudo comparativo entre os escoamentos monofásico e bifásico para este estudo de caso. Nela, tem-se os resultados encontrados neste trabalho para a componente tangencial da velocidade do gás, tanto no escoamento monofásico quanto no escoamento bifásico (denotados na legenda como caso atual). E corroborando tais resultados, apresentam-se os dados experimentais de Patterson e Munz (1989), para a fase gasosa, e de Peres (2002), para o escoamento gás-sólido. Estes resultados corroboram os experimentos numéricos desta pesquisa e confirmam as idéias apresentadas e discutidas acerca do comportamento da influência da fase sólida sobre a fase gasosa, no escoamento bifásico.

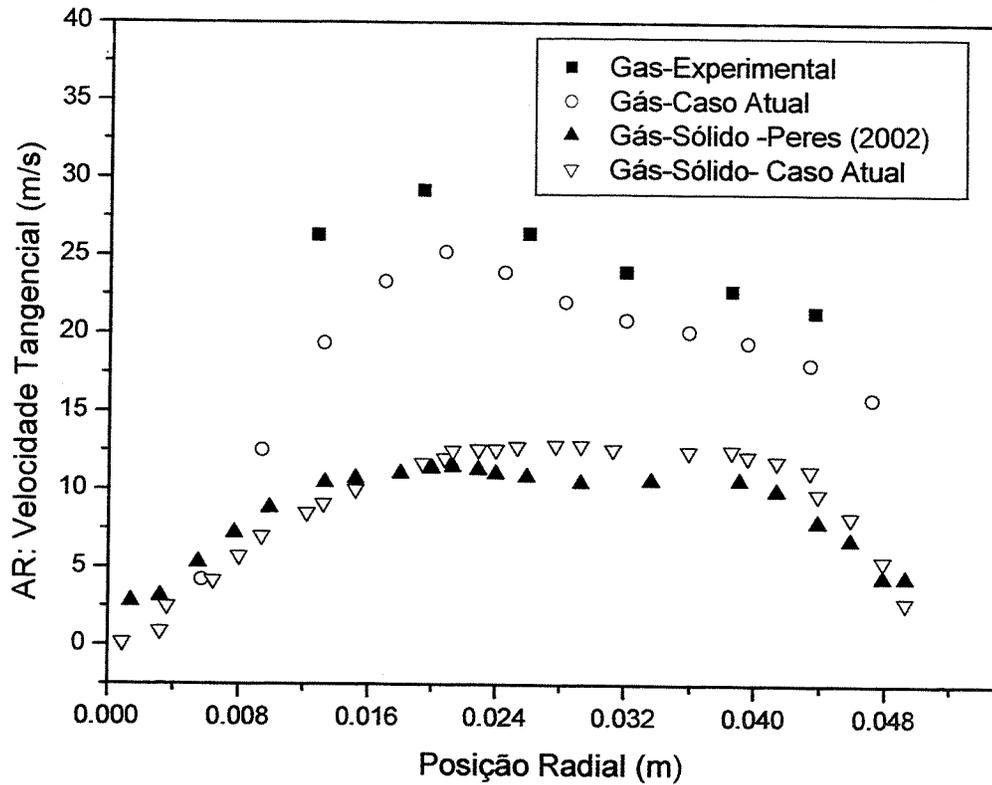


Figura 7.14: Perfil de velocidade tangencial para os escoamentos bifásico e monofásico para o caso 05- Modelo RSM.

Quanto à distribuição da fração volumétrica, a Figura 7.15, na página seguinte, apresenta o mapeamento da distribuição da fração volumétrica para a fase sólida. Neste caso, apresenta-se a figura extraída dos trabalhos com o modelo LES, com o qual se fez um vídeo referente aos 12 segundos de simulação apresentando a coleta de sólidos neste ciclone. O objetivo deste vídeo foi verificar a relação entre o diâmetro das partículas deste caso e sua relação com a força de arraste do gás e, por conseguinte, com a eficiência de coleta do equipamento.

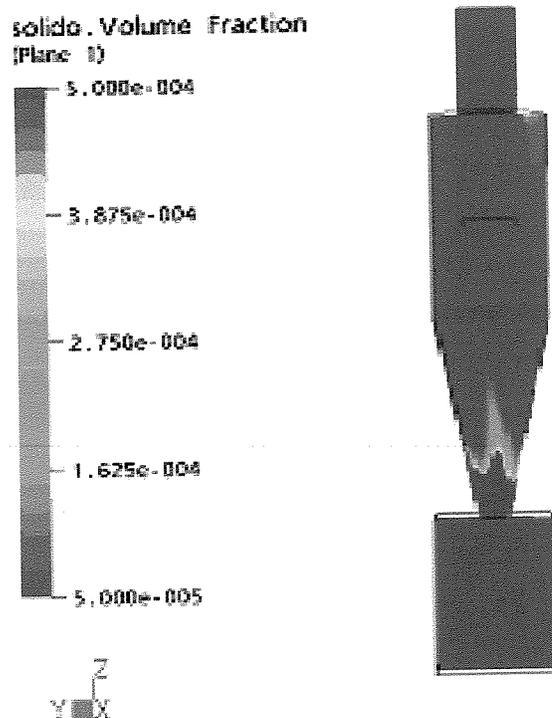


Figura 7.15: Mapeamento dos campos de distribuição da fração volumétrica da fase sólida para o caso 05 – modelo LES.

No caso atual, o diâmetro médio das partículas ($10\ \mu\text{m}$) é bem pequeno, fazendo com que tais partículas sejam mais suscetíveis à força de arraste do gás presente em seu escoamento giratório. Com isso, elas seriam carreadas pela corrente de saída do gás. O vídeo produzido para este caso relata esta observação. Este fato refletirá na eficiência de coleta deste estudo de caso, as ser apresentada no próximo tópico.

7.4.1- Avaliação do desempenho do ciclone para o estudo de caso 05

Para este estudo de caso, a Tabela 7.3, a seguir, apresenta os resultados referentes às características da performance do ciclone no caso 05.

Tabela 7.3: Dados de Performance do ciclone no caso 05 (Comparação entre resultados numéricos e experimentais).

Parâmetro	Vazão na Entrada (g/s)	vazão na Saída (g/s)	vazão Coletada (g/s)	Eficiência de Coleta	Queda de Pressão (Pa)
Experimental	n.d.*	n.d.*	n.d.*	92%	579
Peres(2002)	n.d.*	n.d.*	n.d.*	81%	390
Caso 05- atual	3,1259	0,209053	2,916847	87%	400

*n.d. = não declarado.

Nota-se que o modelo proposto é capaz de prever a diminuição da queda de pressão no ciclone. Ainda, a eficiência de coleta obtida no caso atual está mais próxima àquela obtida experimentalmente, confirmando a boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Salienta-se, mais uma vez, que para o estudo de caso 05 foram testados os modelos RSM e LES, ambos aplicados às malhas refinada e não-refinada. Nos dois casos, os dados numéricos para os perfis de velocidade, pressão e eficiência de coleta foram muito similares, não apresentando diferenças significativas entre os resultados. As causas desta concordância entre os resultados podem ser atribuídas às características geométricas do ciclone deste caso, associado à baixa concentração de sólidos e ao pequeno tamanho das partículas. Por outro lado, as únicas ressalvas são feitas quanto às características relativas ao fenômeno da turbulência no interior do ciclone. Para este caso, as percepções quanto ao comportamento do perfil de velocidades foram melhores ao se aplicar o modelo LES. A discussão destas particularidades sobre o modelo LES é aprofundada no Capítulo 08 desta tese, uma vez que tais características somente foram observadas após o estudo do modelo LES aplicado ao ciclone inclinado (que é objeto de estudo apresentado no Capítulo 08).

7.5- Análise da Trajetória das Partículas

A Figura 7.16 apresenta o mapeamento da trajetória da partícula quando alimentada no interior do ciclone do estudo de caso Yuu *et al.* (1978), com diâmetro da partícula de 163 μm , enquanto a Figura 7.17 apresenta o mapeamento da trajetória da partícula do caso

Patterson e Munz (1989), com diâmetro da partícula de 10 μm . Para a Figura 7.17, a entrada de mais do que uma partícula é representada.

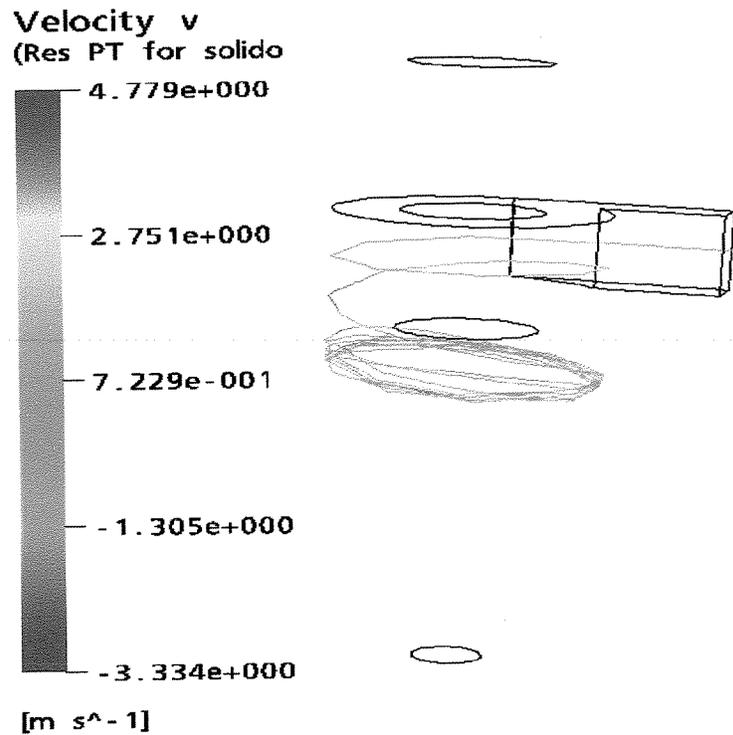


Figura 7.16: Trajetória da partícula no interior do ciclone Yuu *et al.*(1978).

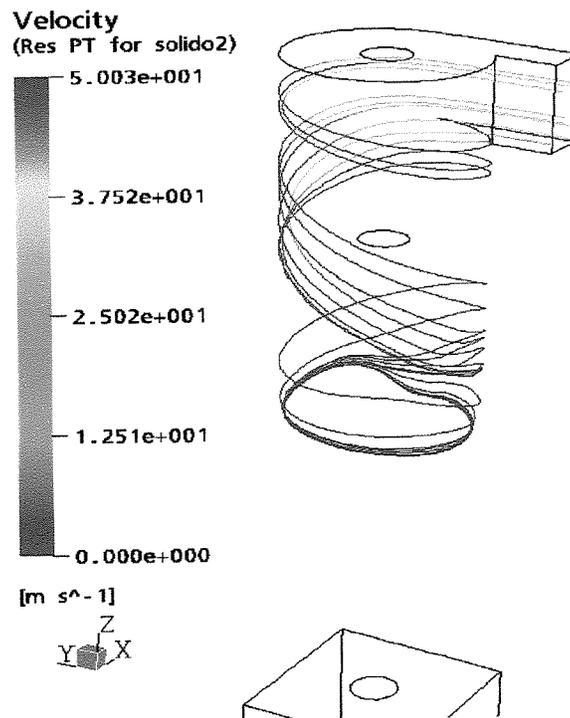


Figura 7.17: Trajetória das partículas para o caso Patterson e Munz (1989).

A análise destas figuras revela que as partículas sólidas, ao adentrarem o interior do ciclone, sofrem ação imediata da força de arraste, sendo lançadas rumo às paredes externas do ciclone. Ao mesmo tempo, sofrem ação da força gravitacional, e a associação destas forças leva à queda da partícula e posterior coleta. Grande parte da trajetória parece situar-se na parte inferior do corpo cilíndrico do ciclone. Daí por diante, a partícula escorre na parte cônica e é coletada.

Um ponto a ser evidenciado refere-se à permanência das partículas ao realizarem o movimento circular na parte cilíndrica do corpo do ciclone. Beeckman et al. (1987) observaram que o ciclone é capaz de manter um teor de sólidos circulando em seu interior por significativos períodos de tempo após a interrupção da alimentação de sólidos. Segundo os autores, isto acontece com concentrações baixas de sólidos, fato este observado no caso atual e também comprovado através das Figuras 7.16 e 7.17. Além disto, tal fato pode ainda estar vinculado às características geométricas de cada equipamento. Para a Figura 7.17, o movimento giratório é mais distribuído ao longo do corpo do equipamento. Uma vez que este ciclone apresenta um diâmetro menor, sua área de giro diminui e com isso a partícula sofre menos o efeito da força de arraste do gás. Comportamento oposto é o apresentado pela partícula representada pela Figura 7.16, na qual o ciclone tem uma maior área na seção cilíndrica.

Os dados disponíveis sobre a trajetória das partículas no interior destes ciclones não permitiram verificar todo o trajeto que uma partícula faria, desde a entrada até a sua coleta. Diversas simulações foram feitas, aumentando o número de iterações, mas os resultados obtidos sempre foram os mesmos. O conjunto de dados apenas atingiu o perfil explicitado nas Figuras 7.16 e 7.17.

CAPÍTULO 08

AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO GÁS-SÓLIDO NOS CICLONES COM MODIFICAÇÕES GEOMÉTRICAS

“Não tenho um caminho novo. O que eu tenho de novo é um jeito de caminhar.”

(Thiago de Melo)

8.1- Apresentação

Neste capítulo são apresentados os resultados para o escoamento bifásico envolvendo as modificações geométricas na seção de entrada do ciclone, apresentadas no Capítulo 06. Foi reservado um capítulo especial a este tema porque nele também se buscou estudar outros modelos de turbulência e suas influências no comportamento fluidodinâmico do escoamento gás-sólido em ciclones. Ao final do capítulo, apresentam-se, ainda, resultados obtidos para a simulação do ciclone estudado por Patterson e Munz (1989), submetido à mudança geométrica no diâmetro do finder, de 50,8 mm para 25,4 mm.

As estratégias de solução para as simulações envolvendo o escoamento gás-sólido foram baseadas no refino da malha numérica apresentada para o escoamento do gás nos ciclones com entrada inclinada (Capítulo 07). Estas estratégias envolvem, em sua essência, as seguintes características: i) Malha numérica de 200000 elementos, uma vez que o modelo LES exige uma malha refinada, optou-se por trabalhar com todos os modelos com a mesma malha refinada; ii) Software CFX 5.6 para simulação em regime transiente, com um tempo de simulação de 12 s, passo de tempo de $5 \cdot 10^{-3}$ s e 4 iterações por passo de tempo; iii) As condições de contorno englobam velocidade de entrada de 2,75 m/s, 7,75 m/s e 15,2 m/s para ambas as fases; iv) Perfis de deslizamento “free slip” para a fase sólida e “no slip” para a fase gasosa na parede; v) Condição de saída do tipo “opening”, com pressão relativa nula como parâmetro.

Como implementação de um modelo adicional para um modelo de pressão para o sólido, usou-se o modelo proposto por Gidaspow (1994), que está disponível no software CFX 5.6. Este modelo ignora o tensor tensão da fase sólida e assume que a pressão do sólido pode ser expressa por uma função empírica da fração volumétrica de sólidos. Todas as condições operacionais foram baseadas no estudo de caso Patterson e Munz (1989), apresentadas na Tabela 7.2 (Capítulo 07).

8.2- Resultados do Escoamento Gás-Sólido para a Proposta de Inclinação de 45° no Ciclone Patterson e Munz (1989).

8.2.1-Resultados obtidos com o modelo RSM

As Figuras 8.1, 8.2 e 8.3, a seguir, apresentam os perfis de velocidade tangencial para os casos em estudo (velocidades iniciais de 2,75, 7,75 e 15,2 m/s, respectivamente).

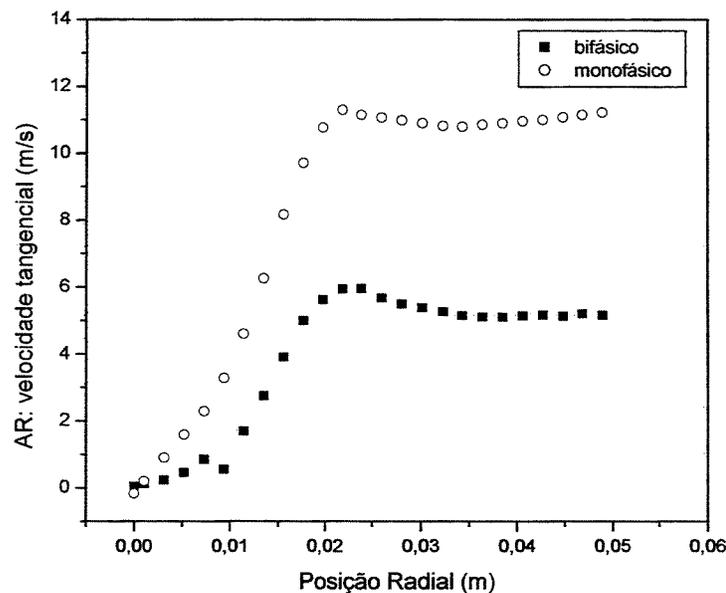


Figura 8.1: Perfis de velocidade tangencial do gás para o ciclone com entrada inclinada em 45° - velocidade inicial de 2,75 m/s.

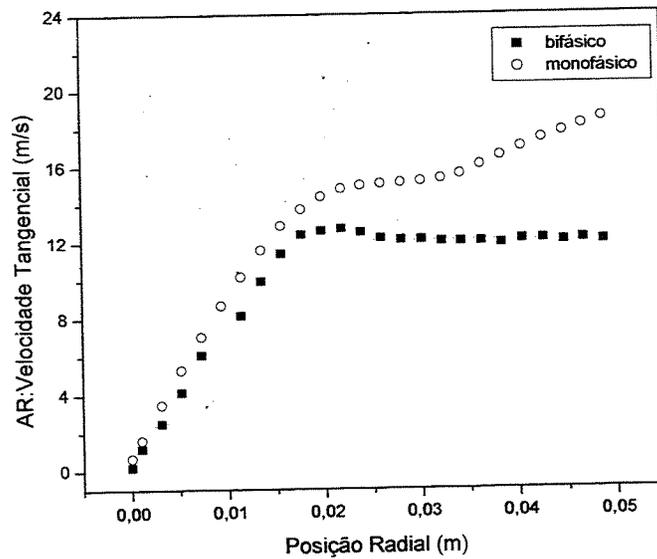


Figura 8.2: Perfis de velocidade tangencial do gás para o ciclone com entrada inclinada em 45° - velocidade inicial de 7,75 m/s.

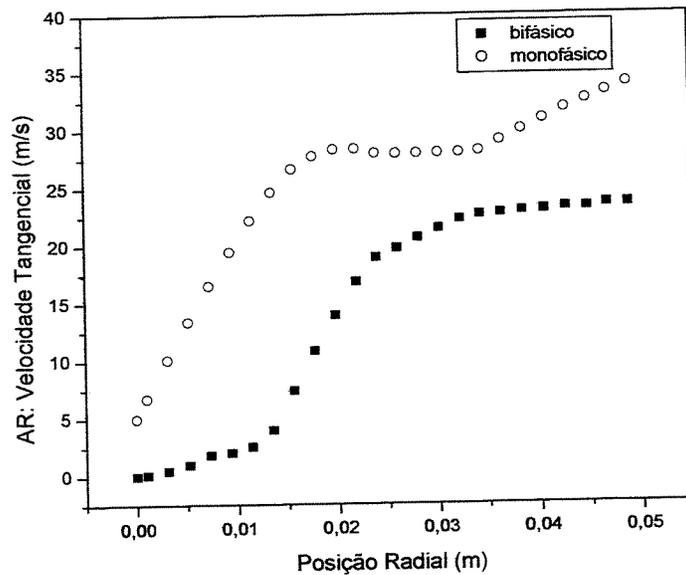


Figura 8.3: Perfis de velocidade tangencial do gás no ciclone com entrada inclinada em 45° - velocidade inicial de 15,2 m/s.

Os resultados evidenciam a influência da presença da fase sólida sobre o escoamento da fase gasosa acerca do perfil de velocidade e da sub-predição da mesma, confirmando o que foi apresentado e discutido no Capítulo 07 desta tese. Observa-se que, na presença da fase particulada, os picos de velocidade reduzem seu valor em torno de

50%, porém, continuando a apresentar valores superiores àqueles obtidos no caso 05 (entrada normal) quando a velocidade de entrada é de 15,2 m/s.

O mapeamento dos campos de velocidade, pressão e fração volumétrica para ambas as fases apresentou um perfil completamente desenvolvido quando a simulação atingiu um tempo real de 6 s, não mais alterando significativamente os resultados a partir deste valor.

As Figuras 8.4 e 8.5, a seguir, apresentam, respectivamente o mapeamento dos campos de velocidade tangencial e axial do gás, evidenciando os picos de velocidade máxima dentro do ciclone.

Percebe-se, através desta figuras, que a reversão do escoamento é influenciada pela velocidade de entrada do ar e pela presença de sólidos na corrente gasosa, não apresentando o fenômeno ao longo de todo o equipamento para a velocidade maior (Figuras 8.4 (a) e 8.4 (b)). Infelizmente não se dispõe dos resultados experimentais das distribuições de velocidade tangencial do gás, na presença e na ausência de sólidos, nos trabalhos de Patterson e Munz (1989). Este parâmetro seria interessante no sentido de se realizar uma comparação entre os resultados para a entrada normal e a entrada inclinada para o ciclone em estudo. Mas as observações de Yuu *et al.* (1978) corroboram os resultados apresentados. Quanto ao mapeamento dos campos de velocidade axial (Figuras 8.5 (a) e 8.5 (b)) permite verificar que a região de máxima velocidade axial situa-se próxima às paredes do duto de saída do gás.

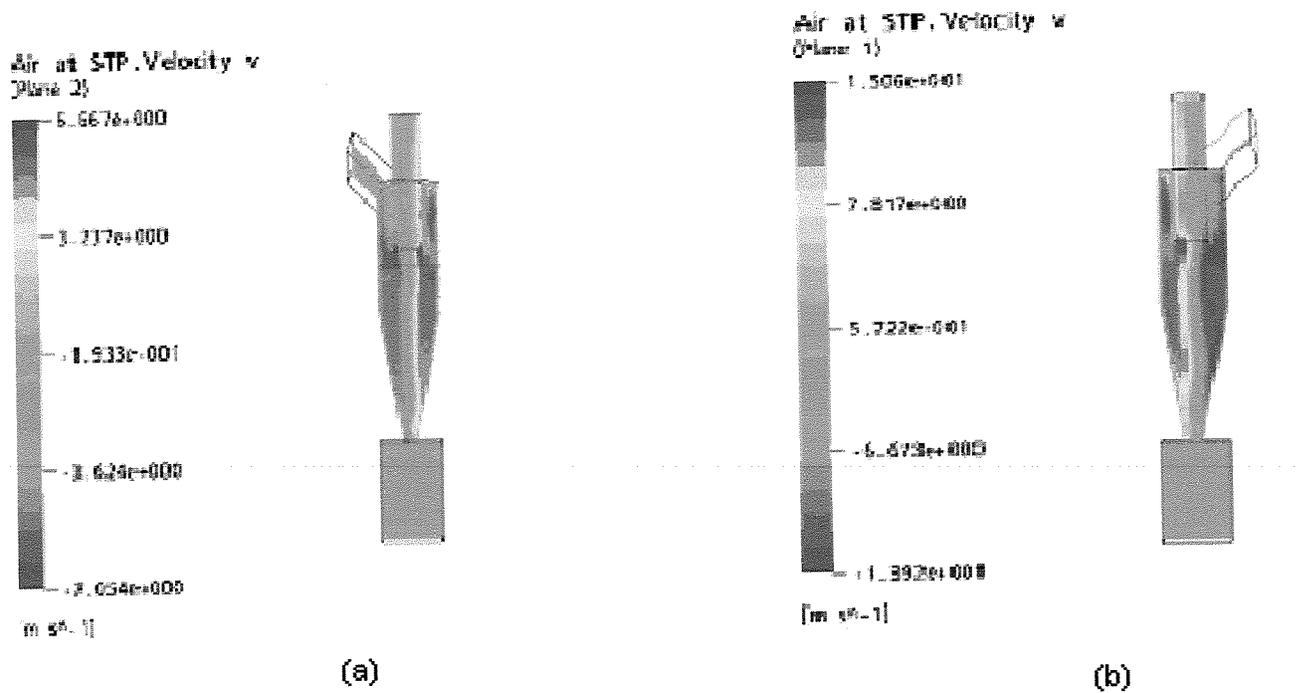


Figura 8.4: Mapa de velocidade tangencial do gás, na presença da fase sólida, onde (a) $v_0 = 2,75$ m/s e (b) $v_0 = 7,75$ m/s.

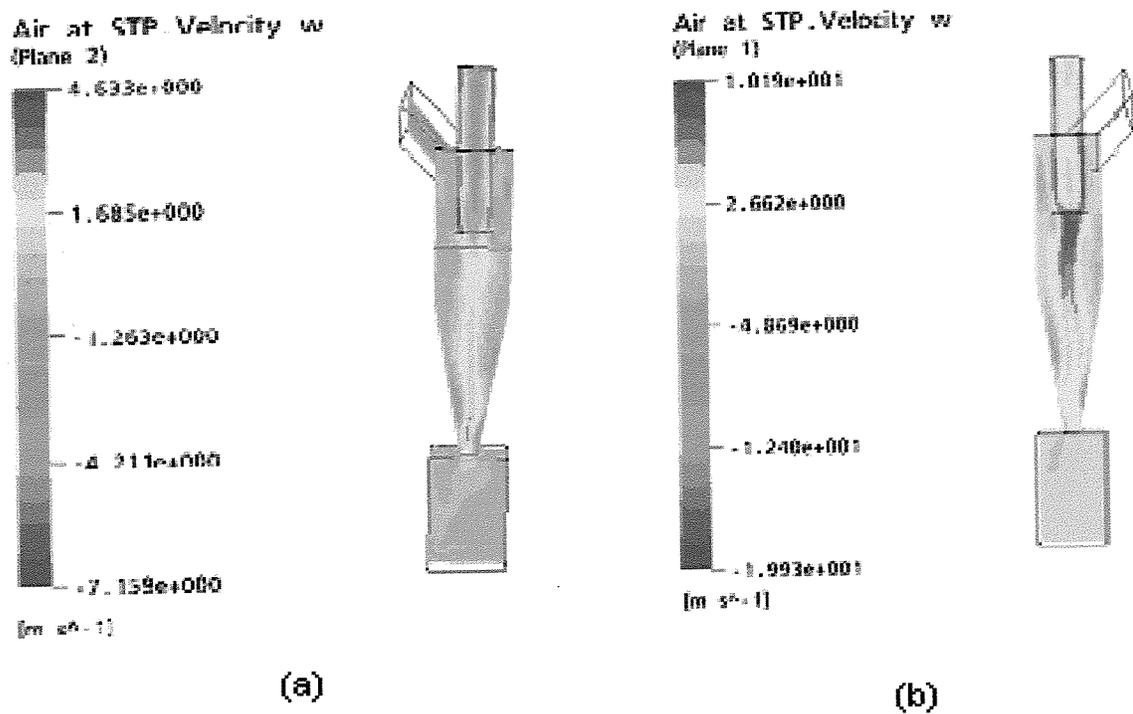


Figura 8.5: Mapa de velocidade axial do gás, na presença da fase sólida, onde (a) $v_0 = 2,75$ m/s e (b) $v_0 = 7,75$ m/s.

8.2.1.1- Avaliação do desempenho do ciclone

A Tabela 8.1 apresenta os valores para a queda de pressão e a razão entre os escoamentos monofásico e bifásico.

Tabela 8.1: Dados referentes à queda de pressão para os experimentos numéricos envolvendo o ciclone inclinado.

Condição de entrada	ΔP Monofásico (Pa)	ΔP Bifásico (Pa)	Parâmetro α	Redução
$v = 2,75\text{m/s}$	170	50	0,30	70%
$v = 7,75\text{m/s}$	390	220	0,56	44%
$v = 15,2\text{ m/s}$	1150	700	0,62	38%

Os parâmetros de queda de pressão obtidos apresentaram o fenômeno de redução da queda de pressão quando da presença da fase particulada sobre o escoamento da fase contínua. Uma avaliação do parâmetro (α), introduzido por Yuu *et al.*(1978) e discutido no Capítulo 07 desta tese, está representada na quarta coluna da Tabela 8.1, indicando um possível percentual de redução da queda de pressão para este caso. Experimentalmente, os trabalhos fizeram uso, apenas, da velocidade de entrada de 15,2 m/s, para o qual a queda de pressão observada foi de 579 Pa, enquanto Peres (2002) encontrou um valor de 390 Pa em seus experimentos numéricos.

A predição da eficiência de coleta para o caso em estudo está apresentada na Tabela 8.2 a seguir. Os dados apresentados foram calculados a partir da equação (7.1).

Tabela 8.2: Dados referentes à eficiência de coleta para os experimentos numéricos envolvendo o ciclone inclinado.

Condições de entrada	vazão mássica na entrada (g/s)	vazão mássica na saída (g/s)	vazão mássica coletada (g/s)	EFICIÊNCIA DE COLETA (%)
$v = 2,75 \text{ m/s}$	0,06345	0,004797	0,0597	85,13
$v = 7,75 \text{ m/s}$	0,1762	0,01281	0,1632	85,48
$v = 15,2 \text{ m/s}$	0,347912	0,01662	0,331292	90,50
Peres (2002)	Não disponível	Não disponível	Não disponível	81

Nos trabalhos de Patterson e Munz (1989), o valor da eficiência de coleta para o caso atual (velocidade de entrada de 15,2 m/s) foi 92%.

Os resultados obtidos, com a modificação geométrica da entrada do ciclone através de sua inclinação em 45° , revelaram uma boa concordância com os dados obtidos experimentalmente, e ainda com dados bem acima do valor numérico obtido por Peres (2002), mostrando ser esta modificação uma alternativa viável ao estudo da melhoria da eficiência de coleta em ciclones. Lembrando sempre que este efeito comparativo é apenas um referencial, uma vez que nenhum dos trabalhos usados na comparação fez uso da entrada inclinada em 45° . Eles correspondem ao mesmo ciclone, só que com a seção de entrada tangencial normal.

8.2.2- Resultados obtidos com o modelo LES

Os resultados obtidos com o modelo RSM mostraram-se satisfatórios quanto à idéia de se avaliar a influência da modificação geométrica sugerida tanto sobre as características fluidodinâmicas quanto nos parâmetros de eficiência de coleta e de queda de pressão. Porém, embalado pelos promissores resultados e face ao número de novas idéias sugeridas, abriu-se uma linha de estudo visando à avaliação de novos modelos para este caso, com o intuito de verificar se ainda seria possível ampliar o desempenho do ciclone sugerido.

No caso da simulação com o modelo LES, grande parte dos parâmetros da simulação foi mantida. Modificações tiveram que ser feitas para que o modelo LES (apresentado no Capítulo 04) fosse compatível com o software CFX. As principais

modificações consistiram na substituição da viscosidade constante (modelo RSM) para viscosidade variável, e a troca do modelo de turbulência para a opção laminar.

Uma vez que o trabalho de Patterson e Munz (1989) refere-se apenas à velocidade de entrada de 15,2 m/s, o estudo envolvendo o modelo LES é feito apenas com esta condição de contorno. Para se trabalhar com o modelo LES, a malha do ciclone inclinado foi refinada para um total de 200000 elementos, aproximadamente, conforme descrito no início do capítulo.

8.2.2.1- Apresentação dos Perfis de Velocidade

As Figuras 8.7 e 8.8 apresentam os perfis de velocidade tangencial e o mapeamento dos campos de velocidade, respectivamente, para o caso atual envolvendo o modelo LES.

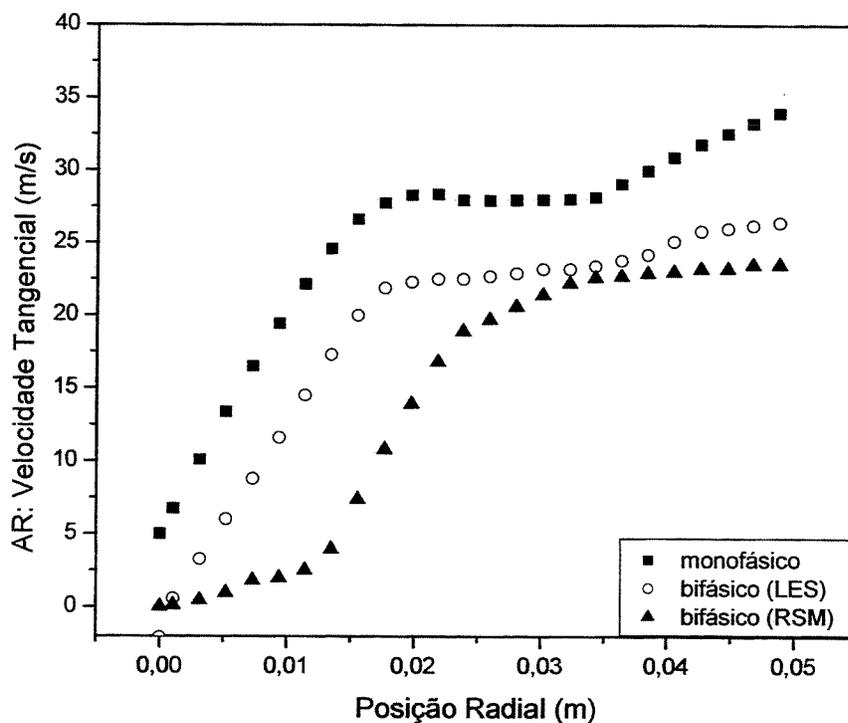


Figura 8.6: Perfil de velocidade tangencial do gás no ciclone modificado. Efeito comparativo de vários modelos.

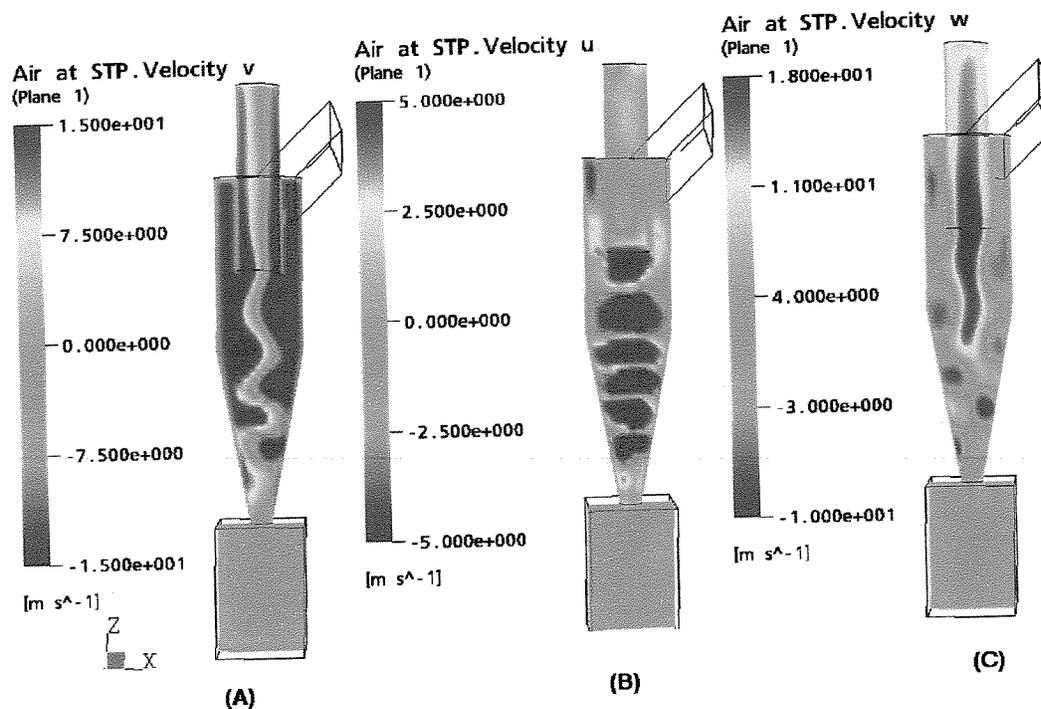


Figura 8.7: Mapeamento do campo de velocidade do gás -(A) tangencial, (B) radial e (C) axial, usando o modelo LES.

A Figura 8.6 mostra que o modelo LES captou o fenômeno de redução da velocidade pela influência da presença da fase sólida no escoamento gasoso. Também foi captado o efeito de modificação no perfil de velocidade. Na Figura 8.7 estão representados os perfis dos três campos de velocidades. Ambas evidenciam formação de grandes turbilhões na região de reversão do escoamento e posterior redução do ponto onde esta reversão ocorre. A implementação das equações para a viscosidade no modelo LES fez com que, neste caso, o escoamento ocorresse considerando uma viscosidade variável para o gás e para o sólido. Este efeito pode ter causado a variação no perfil de velocidade, conforme observado também por Huillin e Gidaspow (2003). O modelo causou um aumento de até 10 vezes na viscosidade efetiva do gás, se comparado à viscosidade constante ($1,825 \cdot 10^{-5}$ kg/ms) aplicada no modelo RSM. O aumento da viscosidade efetiva do gás se dá no sentido das paredes externas do ciclone, ocasionando o aumento verificado da velocidade. A Figura 8.8 mostra a distribuição da viscosidade do gás, considerando todo o diâmetro do ciclone. Com relação ao efeito da viscosidade do sólido, agora variável, a Figura 8.9 apresenta o perfil de viscosidade para a fase sólida.

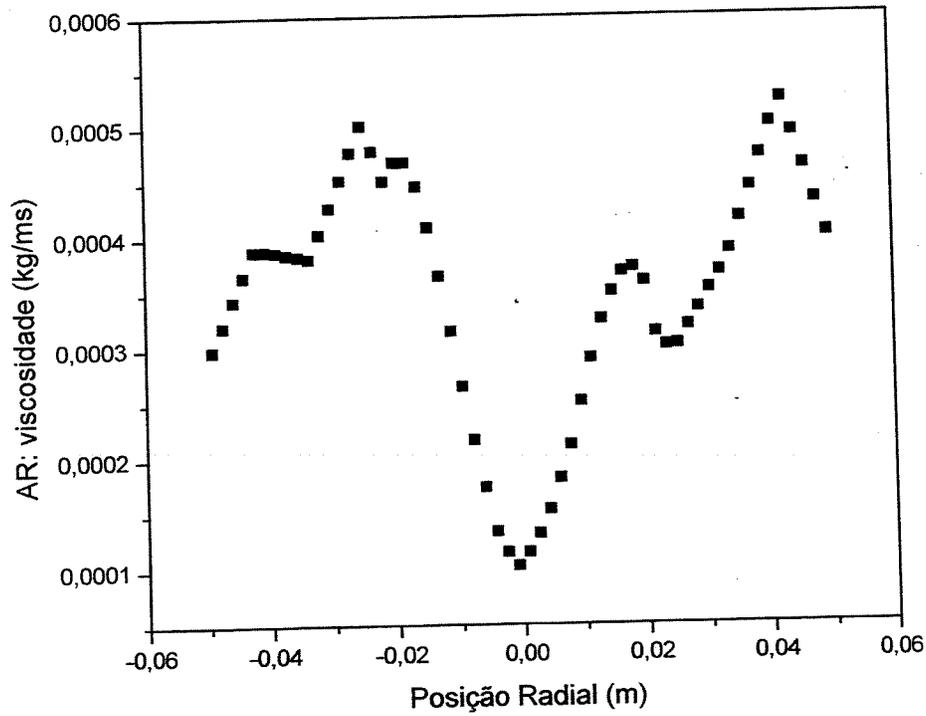


Figura 8.8: Perfil de viscosidade do gás para o modelo LES. Posição axial $z=0,12\text{m}$ a partir do topo da parte cilíndrica do ciclone

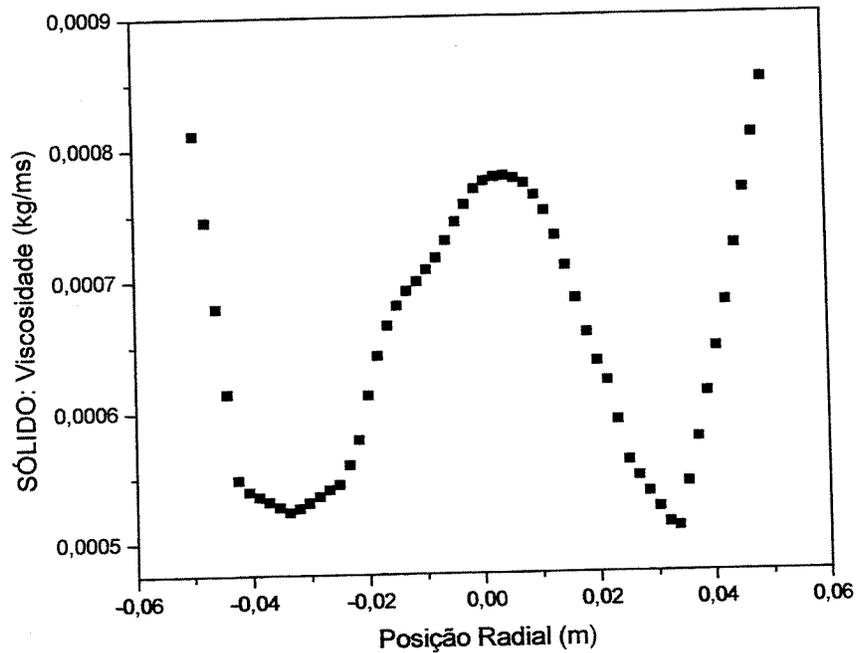


Figura 8.9: Perfil da viscosidade efetiva da fase sólida para o modelo LES. Posição axial $z=0,12\text{m}$ a partir do topo da parte cilíndrica do ciclone

A Figura 8.9 mostra que a viscosidade efetiva da fase sólido aumenta tanto no sentido das paredes do duto de saída de gás quanto das paredes externas do ciclone. Neste sentido, partículas escorrem pela parede do tubo de saída do gás e podem ser arrastadas pela corrente ascendente de gás, sendo portanto não coletadas e fazendo com que haja uma diminuição da eficiência de coleta do ciclone.

8.2.2.2- Avaliação do desempenho do ciclone

As Figuras 8.10 apresenta o mapeamento do campo de pressão para o caso em estudo.

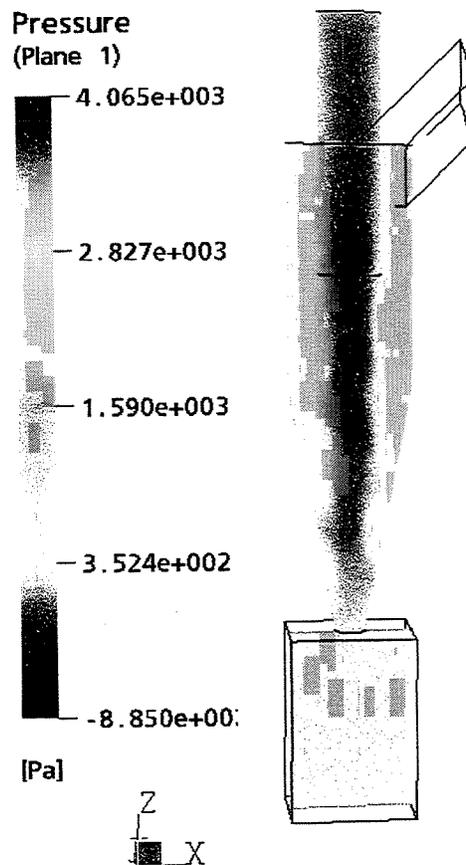


Figura 8.10: Mapeamento dos campos de pressão.

O perfil de pressão obtido é o mesmo encontrado para o caso utilizando o modelo RSM. Para este caso, obteve-se uma queda de pressão de 810 Pa. Aplicando o parâmetro

(α) proposto por Yuu *et al.* (1978), encontra-se o valor correspondente a 0,70, ou seja, uma redução em 30% na queda de pressão em relação ao escoamento monofásico para o ciclone com entrada inclinada.

Duas particularidades deste escoamento devem ser ressaltadas: a relação da viscosidade variável do sólido e a característica de um escoamento diluído, com partículas de diâmetro médio de 10 μm . Estes fatos mostram que o efeito da força de arraste é maior do que a própria inércia da partícula (responsável pela separação do sólido), diferente do que foi observado nos trabalhos com o caso 04 (capítulo 08) para o qual as partículas tinham um diâmetro médio de 163 μm . Para o caso atual, obteve-se o seguinte resultado quanto à eficiência de coleta:

- vazão mássica na entrada: 0,003570702 kg/s;
- vazão mássica na saída: 0,000269022 kg/s;
- vazão mássica coletada: 0,00330168 kg/s.

Aplicando estes dados na equação (7.1), obtém-se uma eficiência de coleta de 84,95%, mostrando que o modelo é capaz de prever bem a diminuição da queda de pressão no ciclone e o aumento na eficiência de coleta, uma vez que captou esta mesma tendência observada para os ciclones com entrada convencional, como os estudados por Yuu *et al.* (1978) e Patterson e Munz (1989).

O modelo LES não apresentou uma melhora significativa nos resultados referentes ao desempenho do ciclone. Para este âmbito, vale lembrar que a funcionalidade deste modelo requer o uso de malhas numéricas refinadas e escoamentos altamente turbulentos. O modelo não é prático para muitos cálculos de engenharia devido à exigência de malha refinada e o grande número de passos de tempo que são necessários para gerar correlações estatisticamente significativas para as componentes de velocidade flutuantes. Entretanto, foi possível captar detalhes na estrutura dos escoamentos turbulentos tais como flutuações de pressão e formação de turbilhões e de pequenos tensores, os quais não puderam ser obtidos ao se adotar a formulação RSM.

8.2.3- Resultados obtidos com o modelo DES

No caso da simulação com o modelo DES, foi mantida grande parte dos parâmetros da simulação com o modelo RSM. No anexo 3 encontra-se o arquivo de comando de linguagem com a implementação do modelo DES no pacote computacional CFX 5.6. Salienta-se que, tal como no caso do modelo LES, para este caso será usada apenas a condição de contorno de velocidade de entrada de 15,2 m/s.

8.2.3.1- Apresentação dos Perfis de Velocidade

O perfil de velocidade tangencial e mapeamento dos campos de velocidade para o gás no caso utilizando o modelo DES encontram-se nas Figuras 8.11 e 8.12 a seguir.

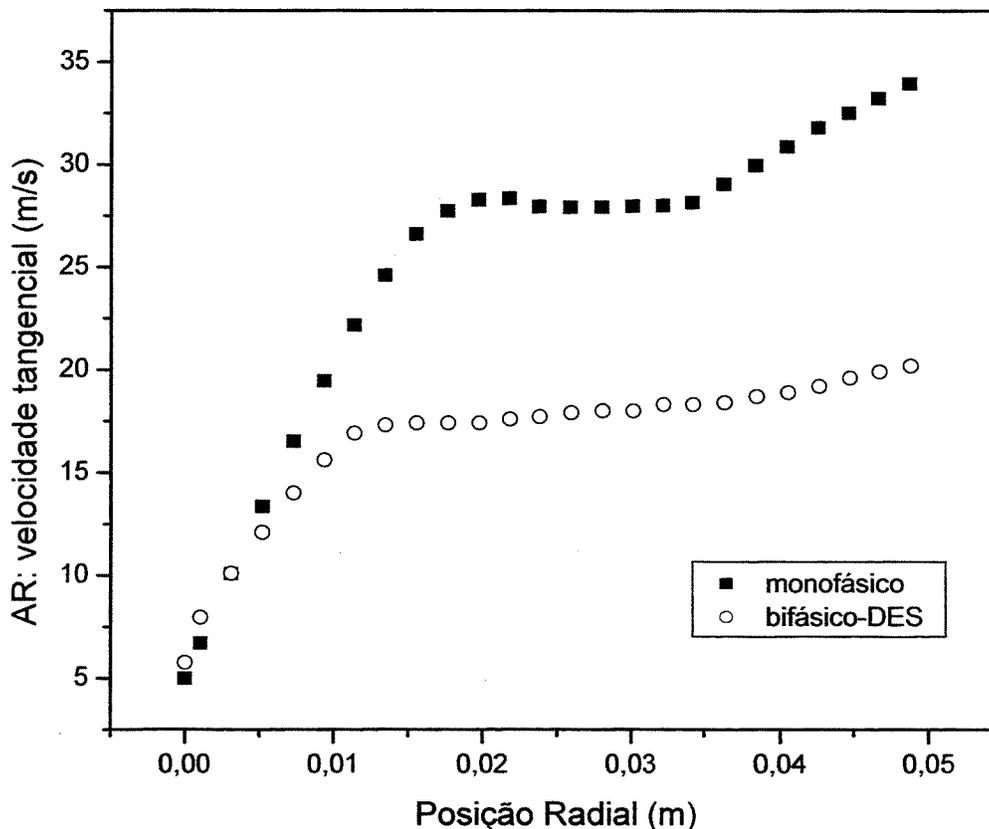


Figura 8.11: Perfil de distribuição de velocidade tangencial do gás usando o modelo DES.

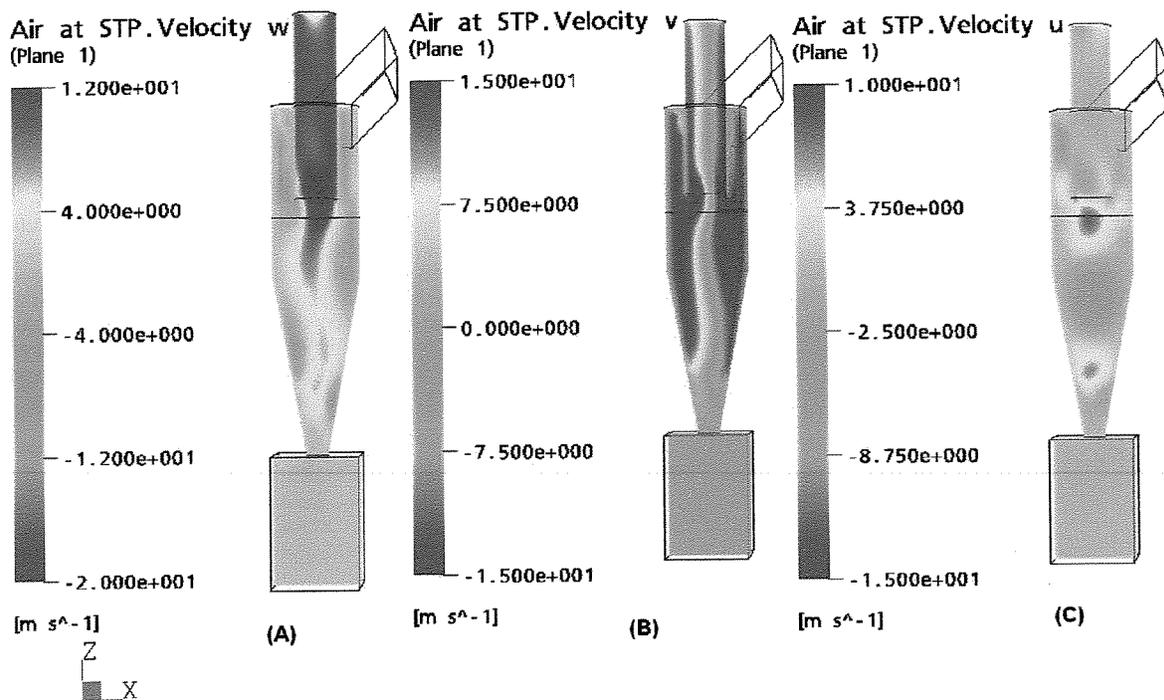


Figura 8.12: Mapeamento dos campos de velocidade do gás usando o modelo DES:
 (A) velocidade axial; (B) velocidade tangencial e (C) velocidade radial.

A análise da Figura 8.11 mostra que o modelo captou a redução do pico de velocidade tangencial do gás, quando da presença de uma fase particulada. Quanto às Figuras 8.12, observa-se que as zonas de formação de turbulência do gás (bem fundamentada através do modelo LES) estão mais suavizadas na região de reversão do escoamento (Figuras 8.12 (A) e (B)). O mesmo ocorreu com a formação de zonas de recirculação, que são menos acentuadas na região de reversão do escoamento e entrada do finder (Figura 8.12 (C)).

Uma grande característica do modelo DES a ser testada refere-se à sua habilidade em simular estruturas turbulentas em regiões de submalhas, sem que haja uma dependência explícita da malha no modelo. Desta forma, ele prevê os níveis corretos de turbulência no processo de formação do vórtex. Tais características puderam ser comprovadas na análise dos quadros de velocidade que compõem a Figura 8.12. Uma observação que deve ser feita quanto a este modelo refere-se ao esforço computacional requerido para processar as soluções do problema. Para o mesmo problema proposto, comparando o uso dos modelos RSM, LES e DES, o modelo DES fez com que a solução fosse atingida mais rapidamente e com a mesma consistência alcançada pelos demais modelos avaliados. Uma comparação

entre os perfis de velocidade tangencial do gás para os três modelos considerados está representada na Figura 8.13, a seguir.

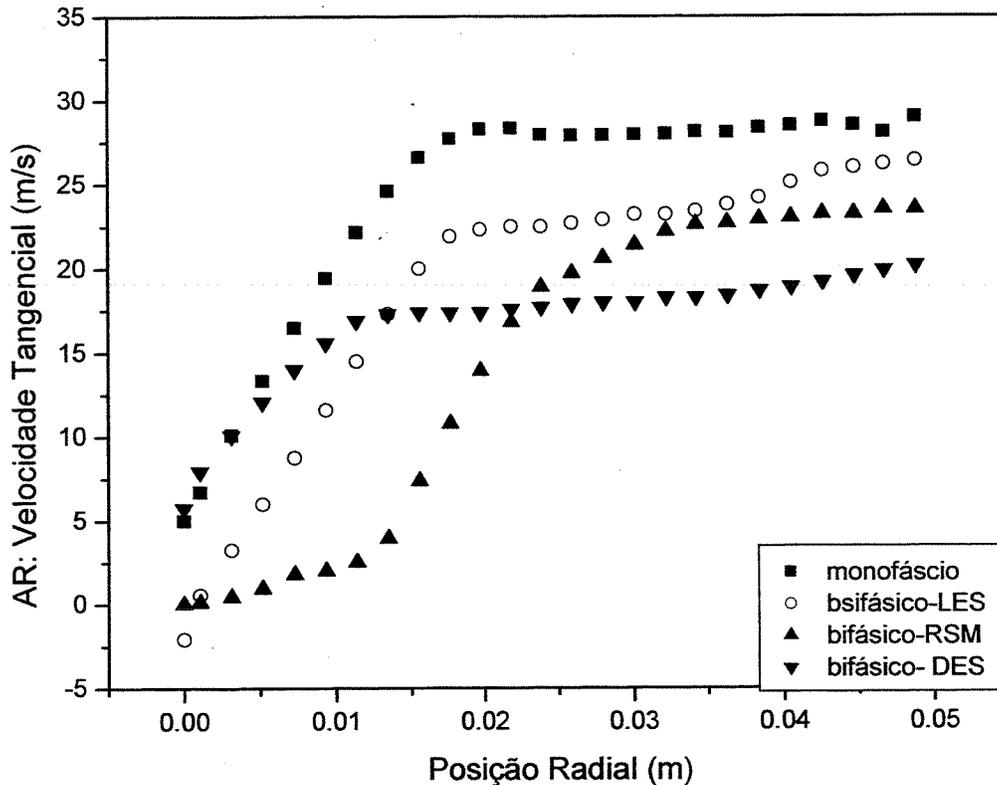


Figura 8.13: Comparação entre os perfis de distribuição de velocidade tangencial do gás usando os modelos RSM, LES e DES.

Na Figura 8.13, é possível observar que todos modelos estudados detectaram a atenuação do perfil de velocidade tangencial, referente à influência da presença da fase sólida sobre a fase gasosa. O modelo LES captou uma variação do perfil de velocidade, para baixo, superior àquela apresentada pelos demais modelos. Este comportamento pode ser atribuído às características estruturais deste modelo, previamente discutidas. Não há aqui como atribuir um conceito de “melhor modelo” para um dos modelos estudados. No conjunto da obra, eles foram capazes de captar perfis de comportamento fluidodinâmico que muito enriquecem o estudo desta modificação geométrica proposta.

Na Figura 8.14, está representado o mapeamento dos campos de velocidade tangencial do gás para os modelos RSM e LES.

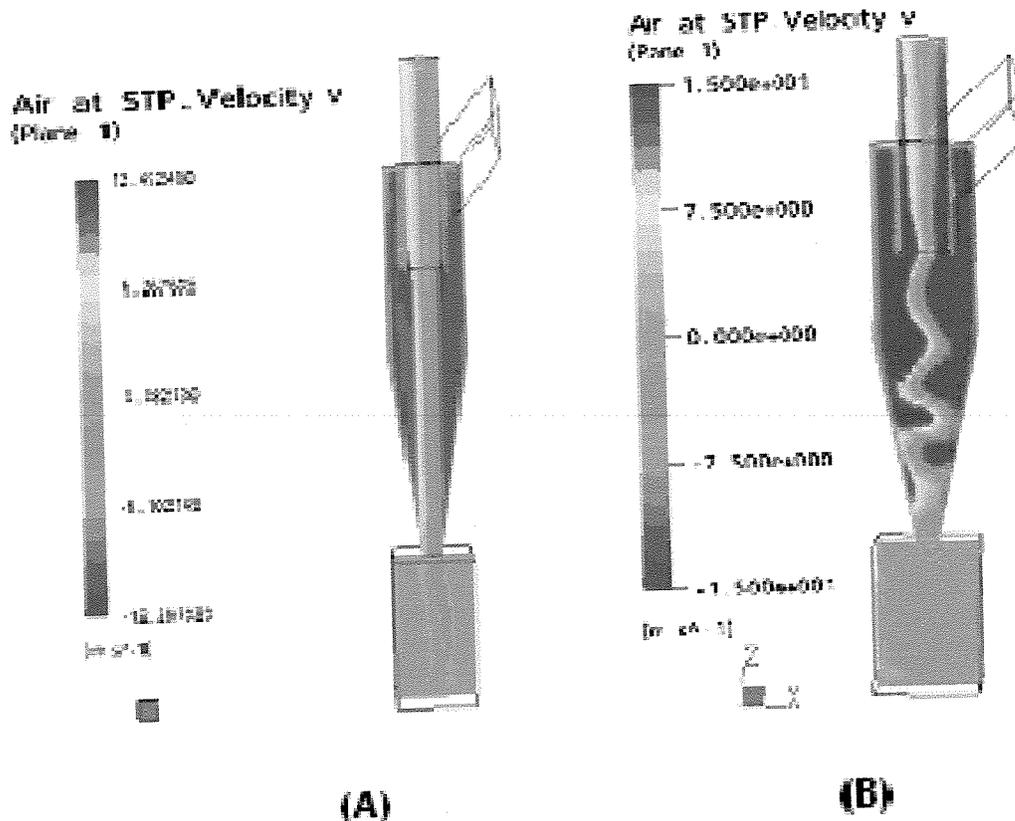


Figura 8.14: Mapeamento dos campos de velocidade tangencial do gás usando os modelos: (A) RSM e (B) LES para o diâmetro do finder de 50,8 mm.

Uma análise da Figura 8.17 (A) mostra que o mapeamento dos campos de velocidade tangencial obtido com o modelo RSM assume um perfil sem variações para o escoamento do gás, especialmente no que se refere ao movimento ascendente rumo ao duto de saída do gás. Por outro lado, ao se trabalhar com o modelo LES (Figura 8.14 (B)), captam-se movimentos turbulentos na região do escoamento do gás e no fluxo ascendente, mostrando que o perfil sem variações não é o perfil condizente com a realidade. Partindo deste ponto de vista, pode-se ponderar se o diâmetro do finder exerce influência na eficiência de coleta por proporcionar um arraste maior de partículas, uma vez que estas partículas (especialmente as de menor diâmetro) seriam arrastadas em virtude destas flutuações turbulentas do escoamento ascendente da corrente gasosa. Para um diâmetro do finder maior, a zona ascendente seria maior e a probabilidade de arraste também aumentaria.

8.2.3.2- Avaliação do desempenho do ciclone

A Figura 8.15 apresenta o perfil de pressão de pressão para o caso em estudo.

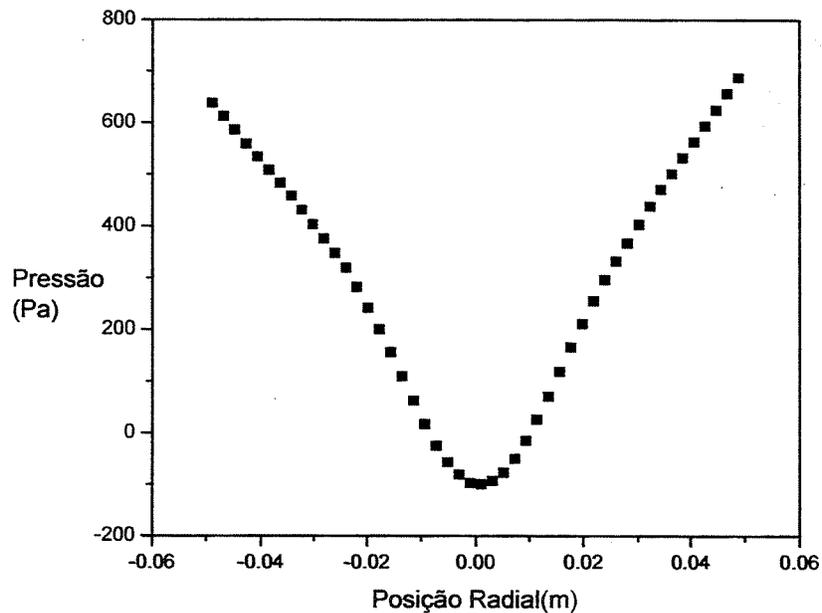


Figura 8.15: Perfil de pressão para o modelo DES, tomado na posição axial $z = -0,12$ m.

O perfil de pressão obtido é o mesmo encontrado para os casos anteriores. Para este caso, obteve-se uma queda de pressão de 720 Pa. Aplicando o parâmetro (α) proposto por Yuu *et al.* (1978), encontra-se o valor correspondente a 0,62, ou seja, uma redução em 38% na queda de pressão em relação ao escoamento monofásico para o ciclone com entrada inclinada. Um valor um pouco maior do que aquele observado para o modelo LES, estudado anteriormente.

A Figura 8.16 apresenta a distribuição da fração volumétrica de sólidos.

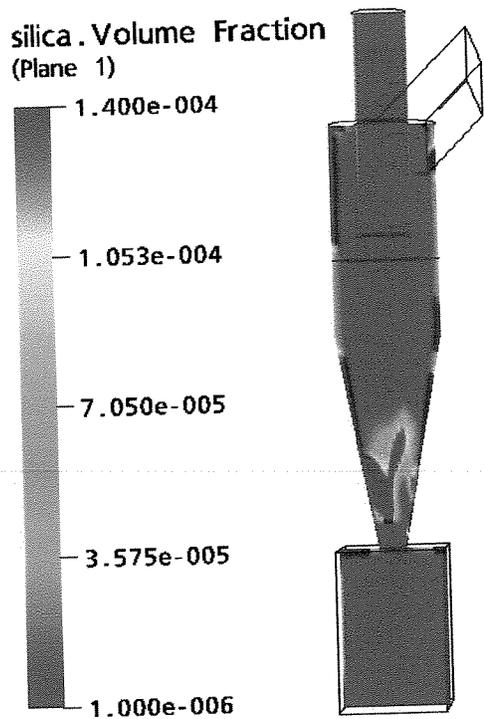


Figura 8.16: Mapeamento do campo de distribuição da fração volumétrica dos sólidos.

Percebe-se, pela inspeção da Figura 8.20, que há uma concentração de sólidos na região próxima às paredes externas do ciclone, como também apresentação do perfil já definido de início de coleta próximo ao coletor de sólidos, significando que houve um arraste de partículas para aquela região. Aqui, valem as mesmas observações quanto às características do escoamento particulado (diluído) e ao tamanho médio das partículas, feitas anteriormente para o modelo LES.

Para o caso atual, obteve-se o seguinte resultado quanto à eficiência de coleta:

- vazão mássica na entrada: 0,003570702 kg/s;
- vazão mássica na saída: 0,000286775 kg/s;
- vazão mássica coletada: 0,00300168 kg/s.

Aplicando estes dados na equação (7.1), obtém-se uma eficiência de coleta de 80,62%, mostrando que o modelo é capaz de prever bem a diminuição da queda de pressão no ciclone e o aumento na eficiência de coleta do mesmo.

Para o escoamento no interior do ciclone, a formulação DES produz uma diferença na qualidade dos resultados, uma vez que grande parte do domínio está coberto pela

formulação RANS (“Reynolds Average Navier-Stokes”), incluindo todo o domínio do corpo do equipamento (parte cilíndrica). Percebe-se a formação de estruturas turbulentas na região de reversão do escoamento, produzidas pela barreira gerada em virtude da presença do duto de saída do gás.

Os modelos RNG-k- ϵ e RSM não foram capazes de prever um nível elevado de turbulência no escoamento e também falharam em capturar, sensivelmente, a separação do escoamento. Por outro lado, os modelos LES e DES apontaram a existência destas zonas turbulentas. É importante frisar que os modelos LES e DES requerem uma malha numérica significativamente refinada, para captar as variações turbulentas. No caso atual, as malhas não possuem um grau de refinamento tão elevado quanto o necessário à captação de todos os fenômenos que o modelo é capaz de simular, mas tem-se uma malha com um número de células grande o bastante para a percepção dos efeitos principais do escoamento turbulento no interior do ciclone.

A Tabela 8.3 apresenta os resultados obtidos para os três modelos de turbulência testados no estudo da influência da modificação geométrica da entrada do ciclone Patterson e Munz (1989).

Tabela 8.3: Resultados de Queda de Pressão e Eficiência de Coleta para o estudo da Influência da Inclinação da Entrada do Ciclone do caso Patterson e Munz (1989).

Propriedade	Patterson e Munz (1989)	Modelo RSM	Modelo LES	Modelo DES
Eficiência de Coleta	92%	90,50%	85%	80,62%
Queda de Pressão	579 Pa	700 Pa	810 Pa	720 Pa
Parâmetro α	Não fornecido.	0,62	0,70	0,63
Redução da Queda de Pressão	Não fornecido	38%	30%	37%

Este estudo gerou um trabalho apresentado no XV Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ 2004. Ainda, a comissão técnica do evento indicou o trabalho para publicação na Revista Engenharia Térmica – RETERM – o qual foi aceito pelo comitê técnico da revista para publicação. O artigo final encontra-se no anexo 2 desta tese.

8.3- Resultados do Escoamento Gás-Sólido para a Proposta de Inclinação de 30° na Seção de Entrada do Ciclone Patterson e Munz (1989).

No caso da simulação do escoamento bifásico, foi utilizado o modelo LES, utilizando uma velocidade de 15,2 m/s para a alimentação da corrente gás-sólido. Todos os parâmetros da simulação para o ciclone inclinado em 45°, envolvendo o modelo LES, foram mantidos para o ciclone inclinado de 30°.

Não se trabalha aqui com os demais modelos estudados, pois a proposta de avaliação dos mesmos já foi amplamente estudada na seção 8.2 deste capítulo. Aqui, quer-se apenas averiguar se uma inclinação menor que 45° forneceria ou não melhores resultados no que se refere aos parâmetros de eficiência de coleta e queda de pressão do equipamento.

8.3.1- Apresentação dos Perfis de Velocidade

A Figura 8.17 apresenta os perfis de velocidade tangencial para o caso atual com o modelo LES.

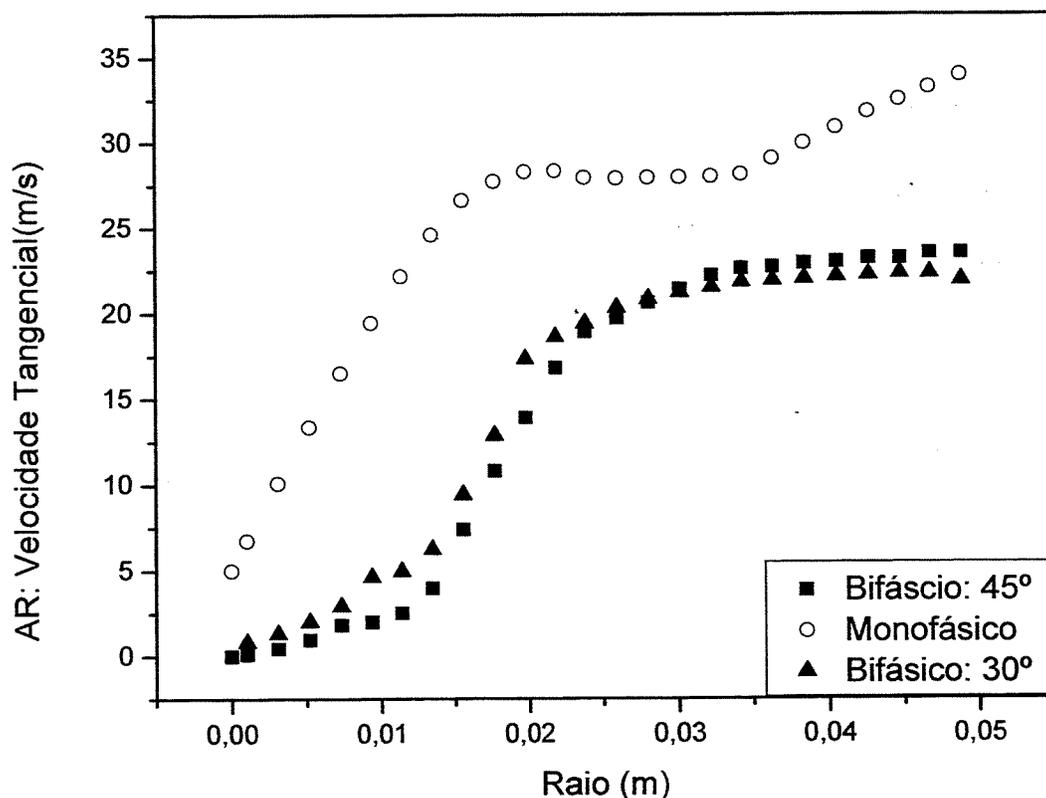


Figura 8.17: Perfis comparativos para a velocidade tangencial do gás em presença de sólidos. Análise do escoamento monofásico e bifásico (30° e 45°).

Pela análise da Figura 8.17, vemos que tanto a proposta de inclinação de 30° quanto a proposta de inclinação de 45° foram capazes de prever a influência da presença da fase sólida sobre a fase gasosa, representado através da atenuação do pico de velocidade tangencial. Semelhante ao que ocorrera com o estudo do escoamento do gás, também no caso do escoamento gás-sólido a inclinação de 30° não resultou em melhoria e/ou modificação significativa frente àquela obtida com o caso a 45°. Desta forma, a seguir, são apresentados apenas alguns mapas de contorno para propriedades fluidodinâmicas obtidas com os resultados da proposta de inclinação a 30°. Os perfis obtidos para estas propriedades são semelhantes àqueles obtidos para a proposta de inclinação de 45° discutida previamente na seção anterior. Desta forma, cabem aqui as mesmas considerações e discussões levantadas quando da inclinação de 45°.

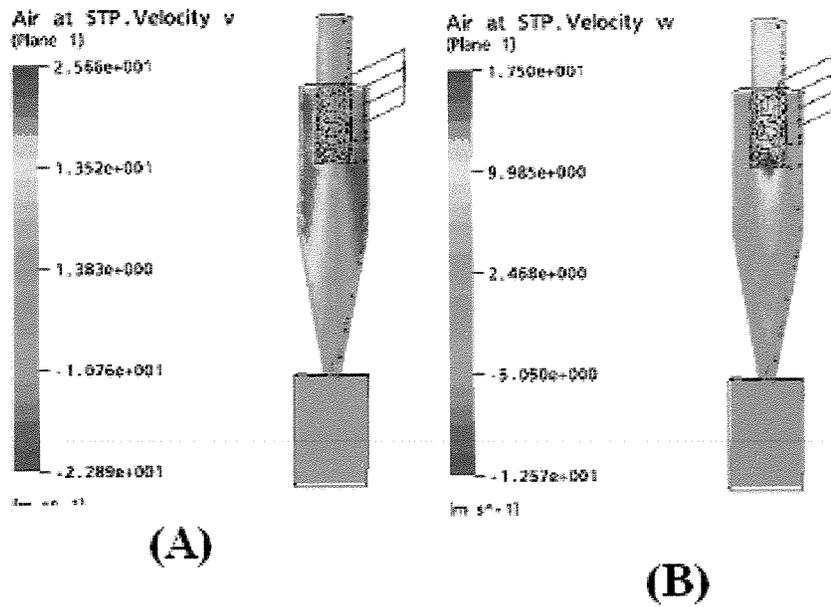


Figura 8.18: Mapeamento dos campos de velocidade do gás -(A) tangencial, (B) axial.

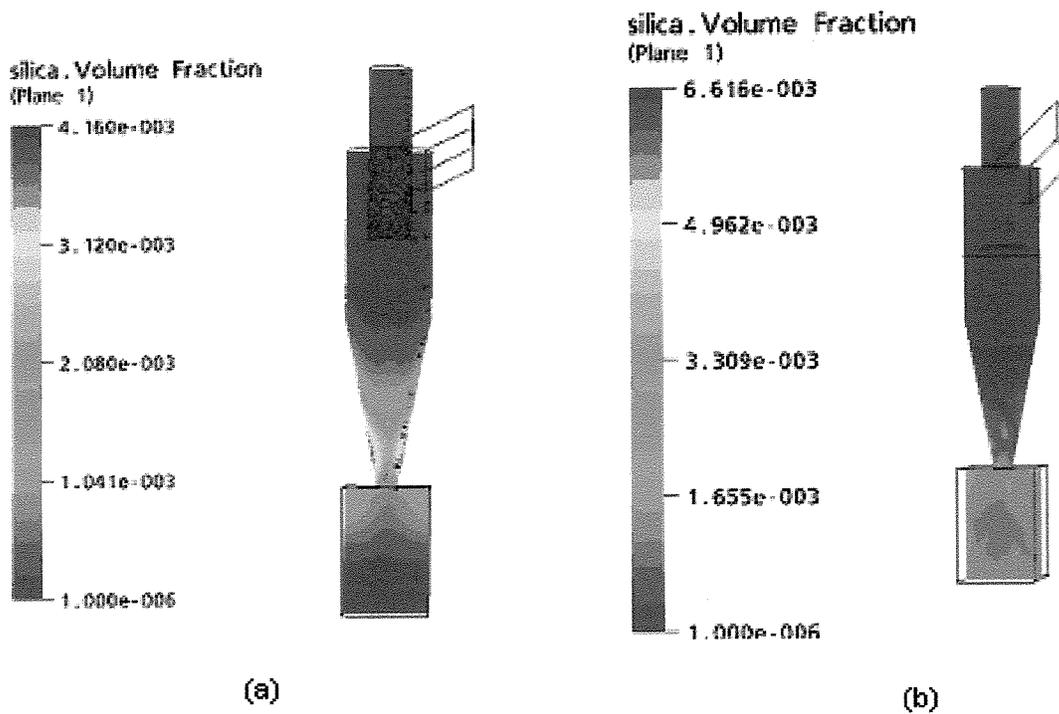


Figura 8.19: Mapeamento do campo de distribuição da fração volumétrica dos sólidos:
(A) inclinação de 30° e (B) inclinação de 45°.

A Figura 8.18 mostra que o modelo LES captou o fenômeno de redução da velocidade pela influência da presença da fase sólida no escoamento gasoso. Também foi captado o efeito de modificação no perfil de velocidade. Os perfis dos dois campos de velocidades evidenciam a formação de grandes turbilhões na região de reversão do escoamento e posterior redução do ponto onde esta reversão ocorre. Todas as observações referentes à viscosidade (tanto para a fase gasosa, quanto para a fase sólida) levantadas para a inclinação de 45°, são válidas para o caso da inclinação a 30°.

8.3.2- Avaliação do desempenho do ciclone

A Figura 8.19 apresenta a distribuição da fração volumétrica de sólidos. Percebe-se, pela inspeção da Figura 8.19, que há uma concentração baixa de sólidos na região próxima ao coletor de sólidos, significando que houve um arraste maior de sólidos rumo à corrente de saída de gás. Duas particularidades deste escoamento devem ser ressaltadas: a relação da viscosidade variável do sólido e a característica de um escoamento diluído, com partículas de diâmetro médio de 10 μm , diferente do que foi observado nos trabalhos com o caso Yuu et al. (1978) para o qual as partículas tinham um diâmetro médio de 163 μm . Para o caso atual, obteve-se o seguinte resultado quanto à eficiência de coleta:

Tabela 8.4: Dados de Performance dos ciclones estudados. Comparação entre resultados numéricos e experimentais.

Parâmetro	vazão na entrada (g/s)	vazão na saída (g/s)	vazão Coletada (g/s)	Eficiência de Coleta	Queda de Pressão (Pa)*
Experimental	*n.f	*n.f	*n.f.	92%	579
Inclinação de 30°	3,1259	0,40109	2,7255	75,71%	500
Inclinação de 45°	3,1259	0,209053	2,916847	87%	400

* n.f : não fornecido

Segundo a Tabela 8.4, a inclinação do ciclone em 30° não apresentou resultados fluidodinâmicos diferentes daqueles obtidos com a inclinação de 45°. O parâmetro referente à eficiência de coleta deste ciclone, segundo a Tabela 8.4, mostra valores menores daqueles obtidos para os casos de inclinação a 45° e também o caso experimental (lembrando que este último faz referência ao ciclone com entrada convencional).

Assim, evidencia-se que a inclinação de 45° representa bem a idéia de modificação geométrica proposta. É importante lembrar que o caso tomado como estudo (Patterson e Munz, 1989 e 1996) apresenta um escoamento altamente diluído e partículas sólidas muito pequenas (diâmetro médio de 10 μm). Estas condições favorecem à baixa eficiência dos resultados apresentados, haja vista que o modelo LES aplicado é bom na captação qualitativa de fenômenos fluidodinâmicos.

8.4 – Avaliação do Ciclone Patterson e Munz (1989) com diâmetro do finder de 25,4 mm.

Em seus trabalhos, Patterson e Munz (1989) não estudaram o escoamento gás-sólido no interior do ciclone com diâmetro de 25,8 mm para o finder. Mas apresentaram esta característica geométrica num trabalho posterior (Patterson e Munz, 1996), tomados como base no estudo do escoamento gasoso, apresentado no Capítulo 6. Então, resolveu-se avaliar o desempenho deste ciclone e inseri-lo aqui neste capítulo, dada a sua característica de mudança geométrica no diâmetro do finder. Não há dados experimentais na literatura disponíveis para este caso. O que se pretende é comparar os dados obtidos para o caso em que o diâmetro do finder é de 50,8 mm.

Avaliam-se as distribuições dos componentes de velocidade tangencial e de pressão obtidas através das simulações usando o modelo de turbulência RSM. A Figura 8.20, a seguir, apresenta a distribuição de velocidade tangencial do gás na presença da fase sólida.

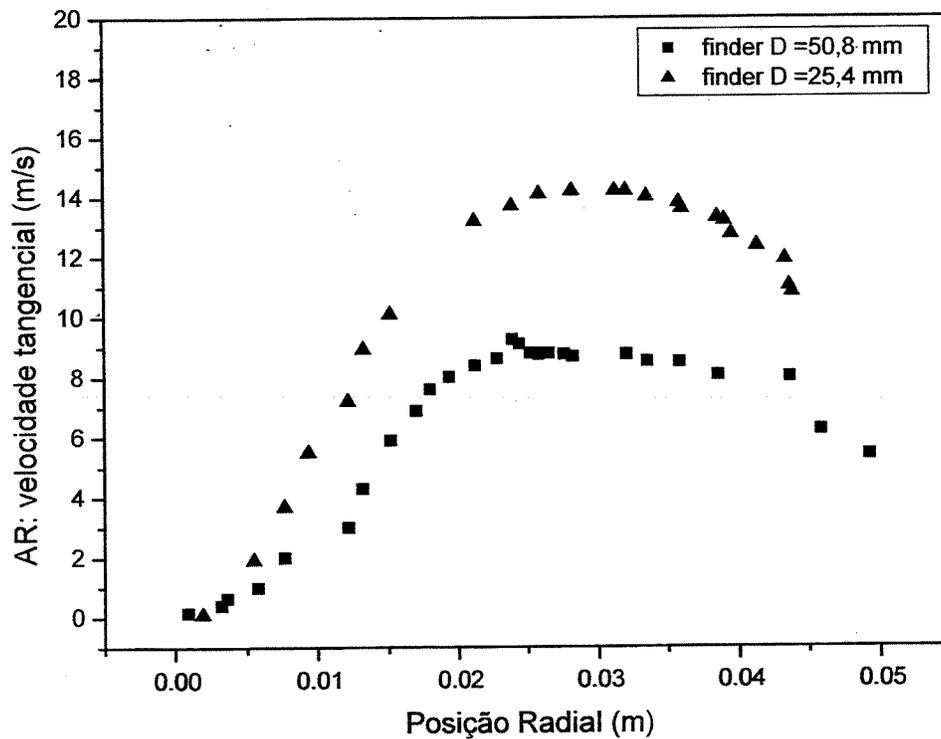


Figura 8.20: Perfil de velocidade tangencial do gás em presença de sólido, para o ciclone com diâmetros: $D = 25,4$ mm e $D = 50,8$ mm, para o caso Patterson e Munz (1996).

Percebe-se que para o diâmetro do finder de 25,4 mm, o perfil de velocidade tangencial do gás é aumentado, sendo este aumento resultante do aumento da região de giro do gás. A Figura 8.21, a seguir, apresenta o mapeamento do campo de velocidade tangencial para as duas configurações geométricas propostas através dos diâmetros do finder. E a Figura 8.22 apresenta o mapeamento do campo de pressão entre os ciclones estudados

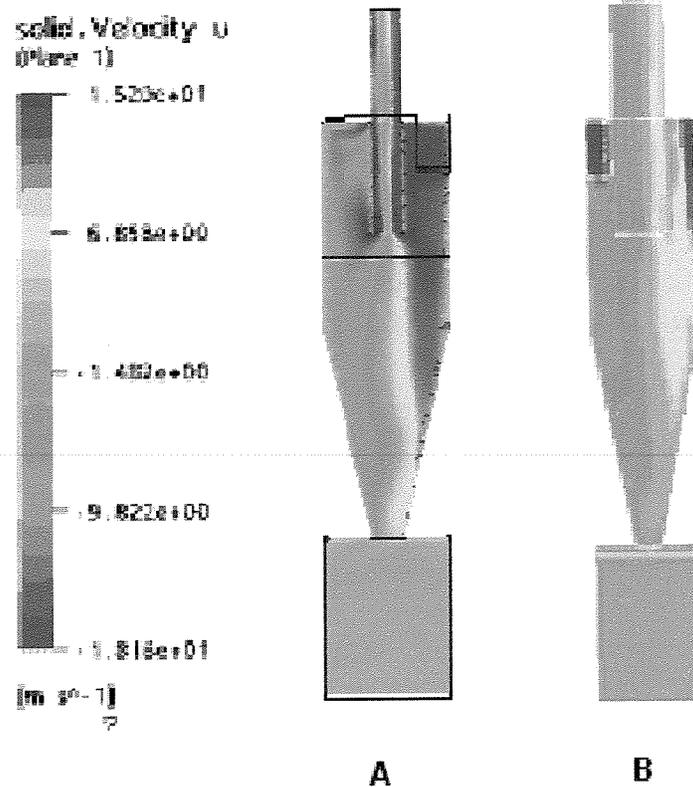


Figura 8.21: Mapeamento do campo de velocidade tangencial do gás em presença de sólido, para os casos: (A) $D = 25,4$ mm e (B) $D = 50,8$ mm.

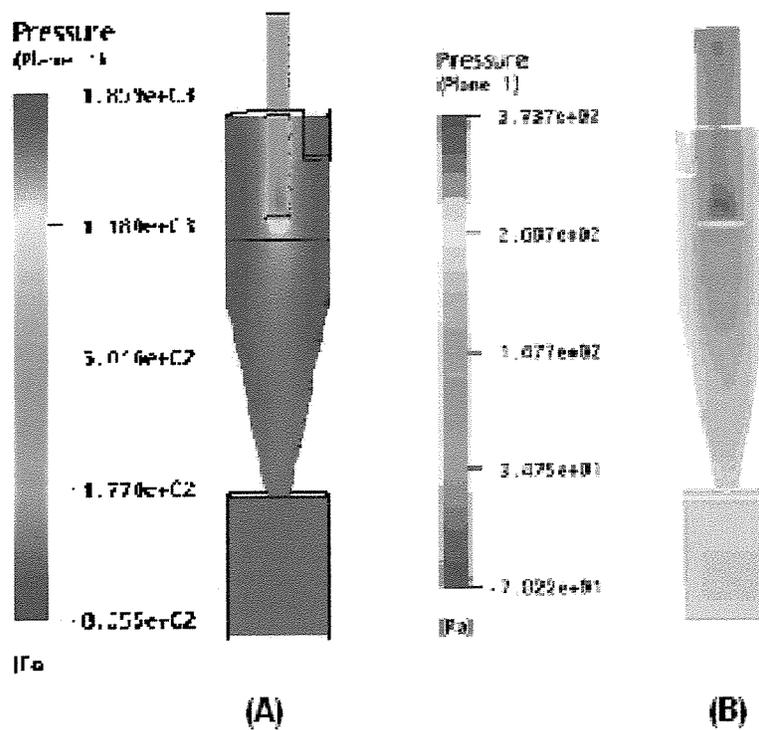


Figura 8.22: Mapeamento do campo de pressão para os casos: (A) $D = 25,4$ mm e (B) $D = 50,8$ mm.

A influência do diâmetro do finder fica evidente pela análise da Figura 8.21 e corrobora a descrição do perfil de velocidade tangencial apresentado na Figura 8.20. Os maiores valores da velocidade tangencial estão representados para o menor diâmetro do finder. Isto pode ser confirmado avaliando uma distribuição radial ao longo do corpo do ciclone. Não há distorções fluidodinâmicas entre os perfis, uma vez que a estrutura dos experimentos numéricos é a mesma. Detalhes visuais referentes ao foco das mesmas e a intensidade das cores são referentes apenas ao modo de construção das figuras.

O objetivo de se estudar diâmetros diferentes para o finder era avaliar as características de desempenho do ciclone (queda de pressão e eficiência). Para tanto, a Figura 8.22, a seguir, apresenta o mapeamento do campo de pressão para o caso do diâmetro de 25,4 mm e 50,8mm do finder.

Na Figura 8.22 (B) observa-se uma região de baixa pressão que se estende por todo o ciclone, situando-se próxima ao eixo de simetria do ciclone. Já para Figura 8.22 (A), a região de baixa pressão situa-se no interior do finder. Tais observações confirmam a influência do diâmetro do finder sobre a fluidodinâmica do escoamento do gás em presença de fase sólida.

Quanto à eficiência de coleta para esta configuração, obtiveram-se os seguintes dados:

- vazão mássica na entrada: 3,12589 g/s;
- vazão mássica na saída: 0,03887 g/s;
- vazão retida no ciclone: 3,087 g/s.

Assim, a eficiência global de coleta para o caso do finder com diâmetro de 25,4 mm foi de 97,51%. O valor é bem superior àqueles obtidos para todos os casos avaliados com o ciclone de mesma geometria e diâmetro do finder de 50,8 mm, apontando ser esta uma modificação que pode trazer aumento na eficiência de coleta do sistema. Conforme comentado no início deste tópico, não há na literatura dados disponíveis para comparar a eficiência obtida aqui.

A eficiência de coleta das simulações envolvendo o finder de diâmetro $D = 25,4$ mm (mantidos inalterados os demais parâmetros para o caso $D = 50,8$ mm) apresentou

resultados de 97,51%, que ficou bem acima daquele observado para o caso do diâmetro do finder de $D = 50,8$ mm apresentado no Capítulo 08. Conforme discussão levantada a partir da Figura 8.15, estes resultados apontam para uma confirmação do que foi exposto ali. O que parece ocorrer é que para uma menor área do duto do finder, a zona turbulenta no movimento ascendente do gás é reduzida, o que diminui o arraste de partículas mais finas e leva a um aumento da eficiência de coleta.

Este não é o único fator a ser considerado no que se refere aos parâmetros de desempenho do equipamento em face do valor do diâmetro do finder. Os efeitos da queda de pressão do sistema também têm sua influência. Para os dois casos estudados, os valores observados para a queda de pressão foram os seguintes:

- ΔP (diâmetro do finder = 25,4 mm) = 1050 Pa;
- ΔP (diâmetro do finder = 50,8 mm) = 460 Pa.

Deste modo, a redução no diâmetro do finder causou um aumento do ΔP do ciclone. Assim, os efeitos do diâmetro do finder nos parâmetros de eficiência mostraram que a redução de seu diâmetro leva a um aumento da eficiência de coleta, associado ao aumento da queda de pressão do sistema. Os resultados obtidos (eficiência de coleta e queda de pressão) mostram que a aplicabilidade desta opção estaria, então, mais diretamente indicada a processos que buscam por maiores eficiências de coleta do equipamento.

8.5- Análise da Trajetória das Partículas

A Figura 8.23 mostra o mapeamento da trajetória das partículas no interior dos ciclones estudados.

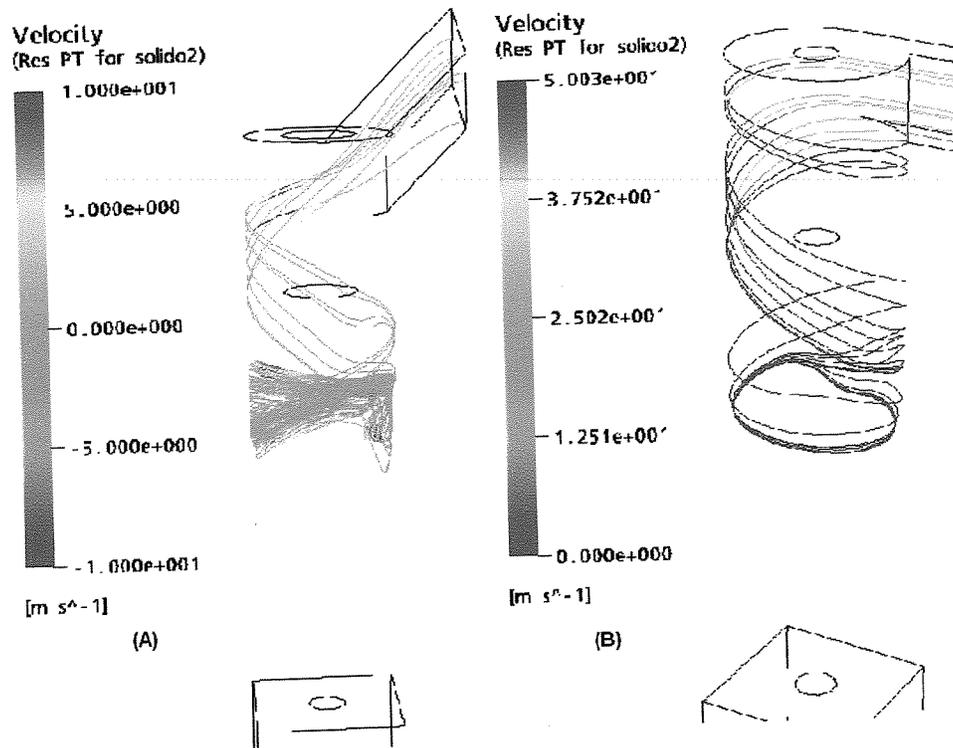


Figura 8.23: Trajetória das partículas: (A) ciclone com entrada inclinada; (B) caso com diâmetro do finder de $D = 25,4$ mm.

A Figura 8.23 (B) mostra a trajetória de partículas num ciclone com entrada tangencial. As partículas percorrem todo o espaço da parede desde a seção de entrada, no sentido tangencial e axial. Com isso, varrem ponto a ponto, em sentido descendente, todo o corpo do ciclone. Já a Figura 8.23 (A) mostra que, em virtude da inclinação da seção de entrada, as partículas sólidas são direcionadas axialmente para baixo, deixando algumas zonas mortas na parte superior do corpo cilíndrico do ciclone. Neste caso, há uma região de giro para a trajetória da partícula na parte inferior do corpo cilíndrico do ciclone. Daí por diante, a partícula escorre na parte cônica e é coletada. Percebe-se ainda a permanência das partículas ao circular na parte cilíndrica do corpo do ciclone, fato este relacionado às características geométricas de cada equipamento.

Para a Figura 8.23 (B), o movimento giratório é mais distribuído ao longo do corpo do equipamento. Ambos os ciclones têm o corpo cilíndrico com o mesmo diâmetro, divergindo apenas na seção de entrada e diâmetro do finder.

CAPÍTULO 09

AValiação da Influência da Inclinação da Seção de Entrada em Ciclones de Escala Industrial

*“As grandes idéias são aquelas nas quais a única coisa que nos
surpreende é que não nos tivessem ocorrido antes.”*

(Noel Clarasó)

9.1- Apresentação

Este estudo foi inspirado nos resultados dos trabalhos apresentados nos Capítulos 06 e 08, acerca da avaliação da influência da inclinação da seção de entrada do ciclone sobre a fluidodinâmica do escoamento, como também sobre os parâmetros de performance em ciclones.

Anteriormente, estudou-se a influência da inclinação da seção de entrada de 30^o e 45^o, tomando como base de estudo o ciclone estudado por Patterson e Munz (1989, 1996). Os resultados obtidos apontaram para a viabilidade desta modificação geométrica frente aos parâmetros fluidodinâmicos do escoamento, representados pelo aumento da velocidade do ar no interior e redução da queda de pressão do mesmo. Quanto aos dados de eficiência de coleta, no entanto, os resultados mostraram-se insuficientes para uma melhor avaliação. Isto deveu-se, provavelmente, ao fato de que os trabalhos de Patterson e Munz (1989, 1996) foram desenvolvidos com um ciclone em escala de bancada (65 cm de altura) e que utilizaram um escoamento altamente diluído, com partículas de diâmetro médio de 10 µm. Deste modo, a captação do efeito da modificação geométrica sobre a performance do equipamento não foi suficiente para afirmar sua eficácia.

Com o intuito de esclarecer tais dúvidas, propôs-se o estudo atual, focalizando um escoamento mais concentrado utilizando um ciclone de escala industrial. Este estudo foi dividido em duas frentes. Na primeira delas, foi simulado o ciclone padrão (aqui chamado ciclone com entrada normal). Em seguida, propôs-se a inclinação da seção de entrada deste

ciclone em ângulos de 30° , 45° e 60° , respectivamente, em relação ao corpo do ciclone. Para estas duas partes do estudo, foram realizados experimentos numéricos envolvendo escoamentos em fase gasosa (aqui chamado 1F - monofásico) e escoamentos bifásicos, com gás e sólidos (aqui chamado 2F- bifásico).

9.2- Características Geométricas do Sistema em Estudo

O ciclone em estudo no caso atual tem características industriais. Dentre suas particularidades, tem-se a seção de entrada com entrada em voluta.

Os resultados obtidos referem-se às simulações numéricas de um ciclone de dimensões industriais com entrada em voluta e cuja configuração é muito empregada na indústria de cimento. A Tabela 9.1 abaixo apresenta as características adimensionalizadas deste equipamento.

Tabela 9.1: Dimensões do ciclone industrial em estudo (fonte: Peres (2002)).

Ds/Dc	D_L/Dc	Le/Dc	Lc/Dc	Ls/Dc	Lco/Dc
0,57	0,16	0,34	0,71	0,43	0,99

Onde Dc é o diâmetro do ciclone, equivalente a 7,5m.

Com:

Le: Altura da seção retangular de entrada;

Ls: Altura do tubo de saída superior do ciclone (“overflow”);

Lc: Altura da região cilíndrica do ciclone;

Lco: Altura da região cônica do ciclone;

Lb: Altura da caixa coletora de sólidos (“Hopper”);

Ds: Diâmetro do tubo de saída superior do ciclone (“overflow”);

DL: Diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone (“underflow”);

A partir das configurações acima, foram construídas as malhas numéricas para o ciclone com entrada normal e com as entradas inclinadas em 30° , 45° e 60° . Todas as malhas construídas possuem 811581 células hexaédricas, construídas no ICFM CFD Hexa. A Figura 9.1, a seguir, apresenta as malhas destes ciclones anteriormente descritos.

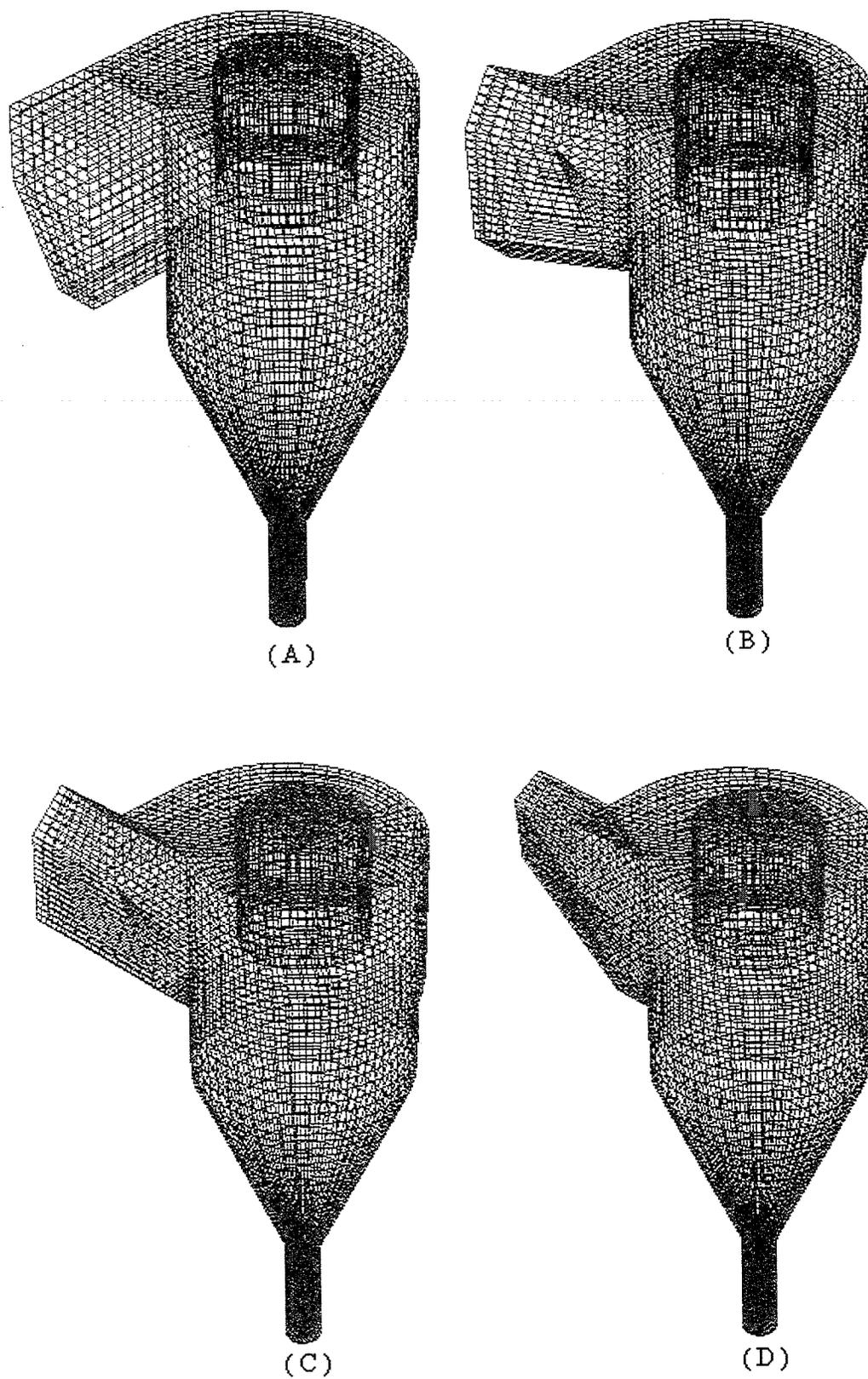


Figura 9.1: Malhas 3-D dos ciclones estudados: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60° .

9.3- Simulação do Escoamento do Gás

As simulações foram realizadas usando o software CFX 5.7. A velocidade de entrada do gás (ar) que foi usada nas simulações é a mesma das condições operacionais em uma indústria de cimento, 15,8 m/s. Os experimentos numéricos foram realizados em regime transiente, com um tempo total de simulação de 11 s e um passo de tempo de 0,005 s. O modelo de turbulência aplicado ao estudo foi o RSM. A posição de 0,53 D_c (a partir do topo do ciclone) foi utilizada para as tomadas dos pontos para o estudo. A Figura 9.2 apresenta o perfil de distribuição de velocidade tangencial do gás e dos ciclones inclinados em estudo.

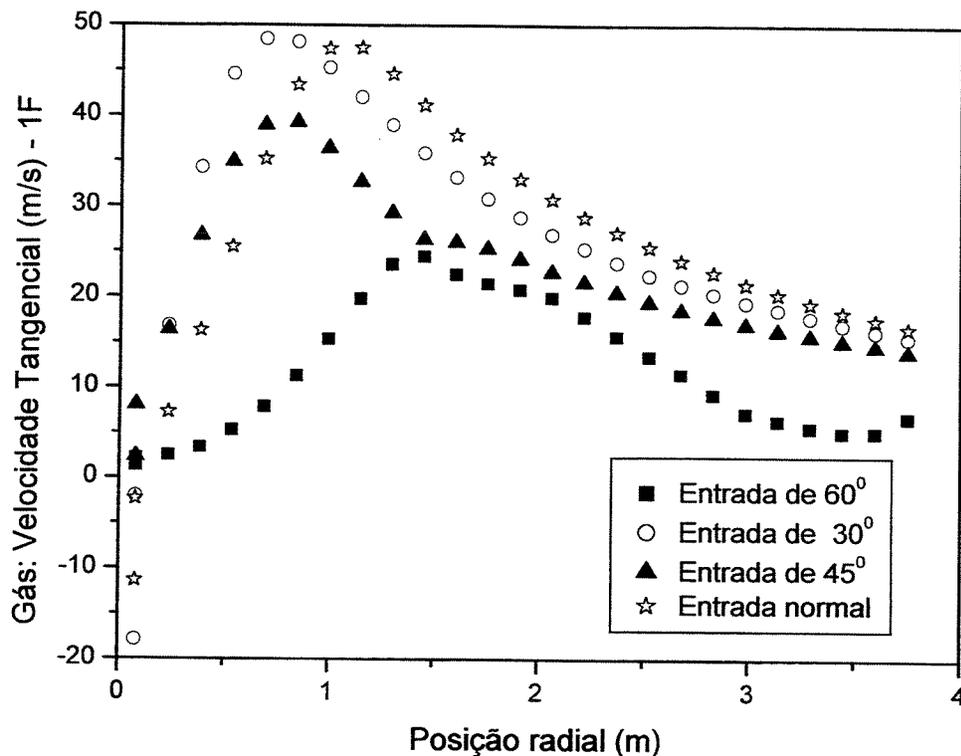


Figura 9.2: Distribuição da velocidade tangencial do gás nos ciclones industriais estudados.

Conforme observado nos casos de inclinação da seção de entrada apresentados no capítulo 06, a influência da inclinação da seção de entrada sobre a distribuição das velocidades, e principalmente sobre o aumento no pico de velocidade atingido, foi mais acentuada quanto menor era a velocidade de entrada do gás e menor era o ângulo de inclinação. Naquele caso, a velocidade de entrada de 15,2 m/s utilizada para um ângulo de inclinação de 45° não mostrou alterações significativas entre os perfis de velocidade para o

caso normal e o caso inclinado. Aqui, a análise da Figura 9.2 confirma tais observações. Ela evidencia ainda outra tendência: a de que, para a velocidade do gás de 15,8 m/s na seção de entrada, houve uma redução do pico de velocidade tangencial do gás à medida que aumentava-se o ângulo de inclinação.

Os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e de pressão são apresentados nas Figuras 9.3, 9.4 e 9.5 apresentadas a seguir.

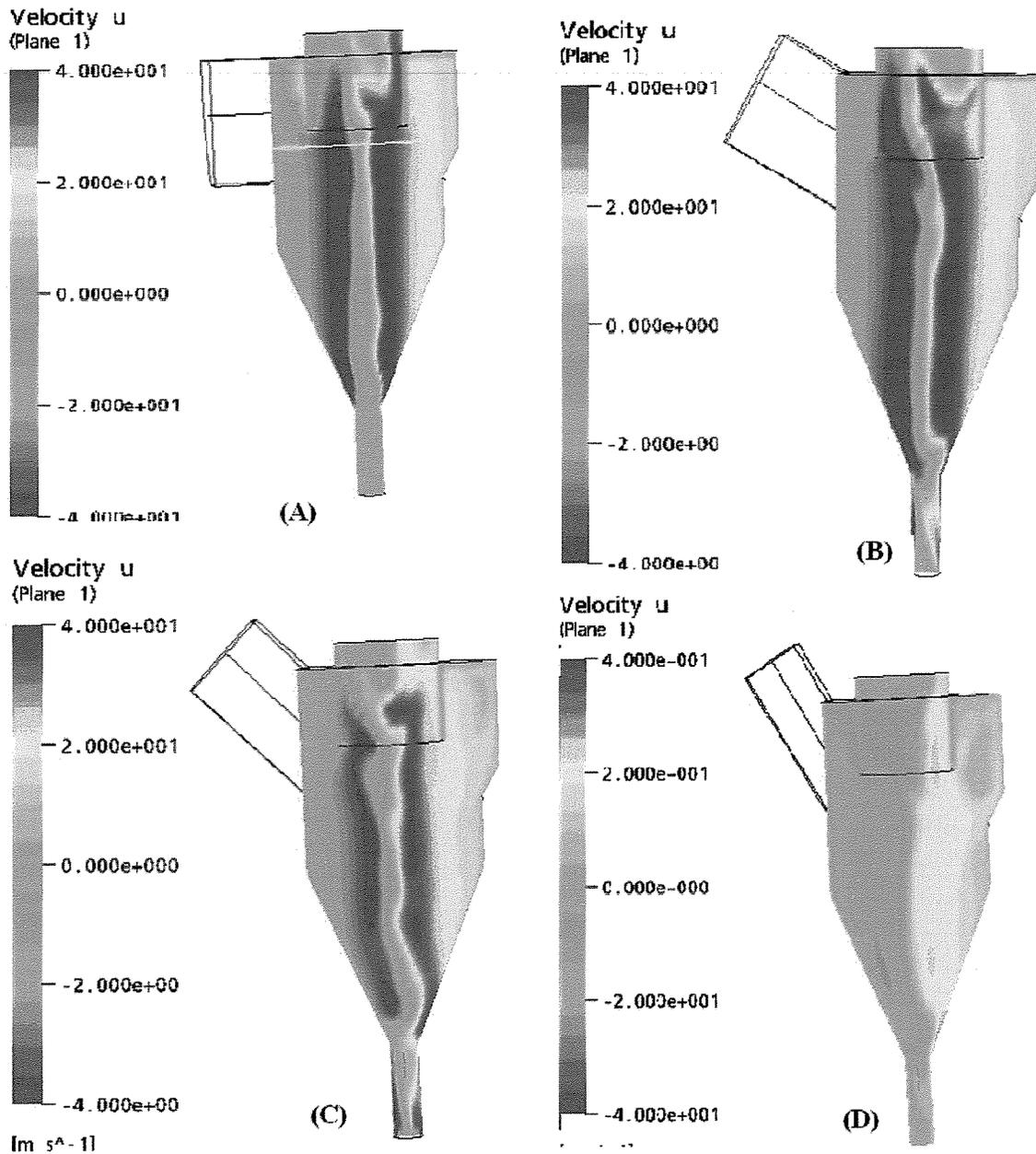


Figura 9.3: Mapeamento dos campos de velocidade tangencial: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30°, (C) 45° e (D) 60°.

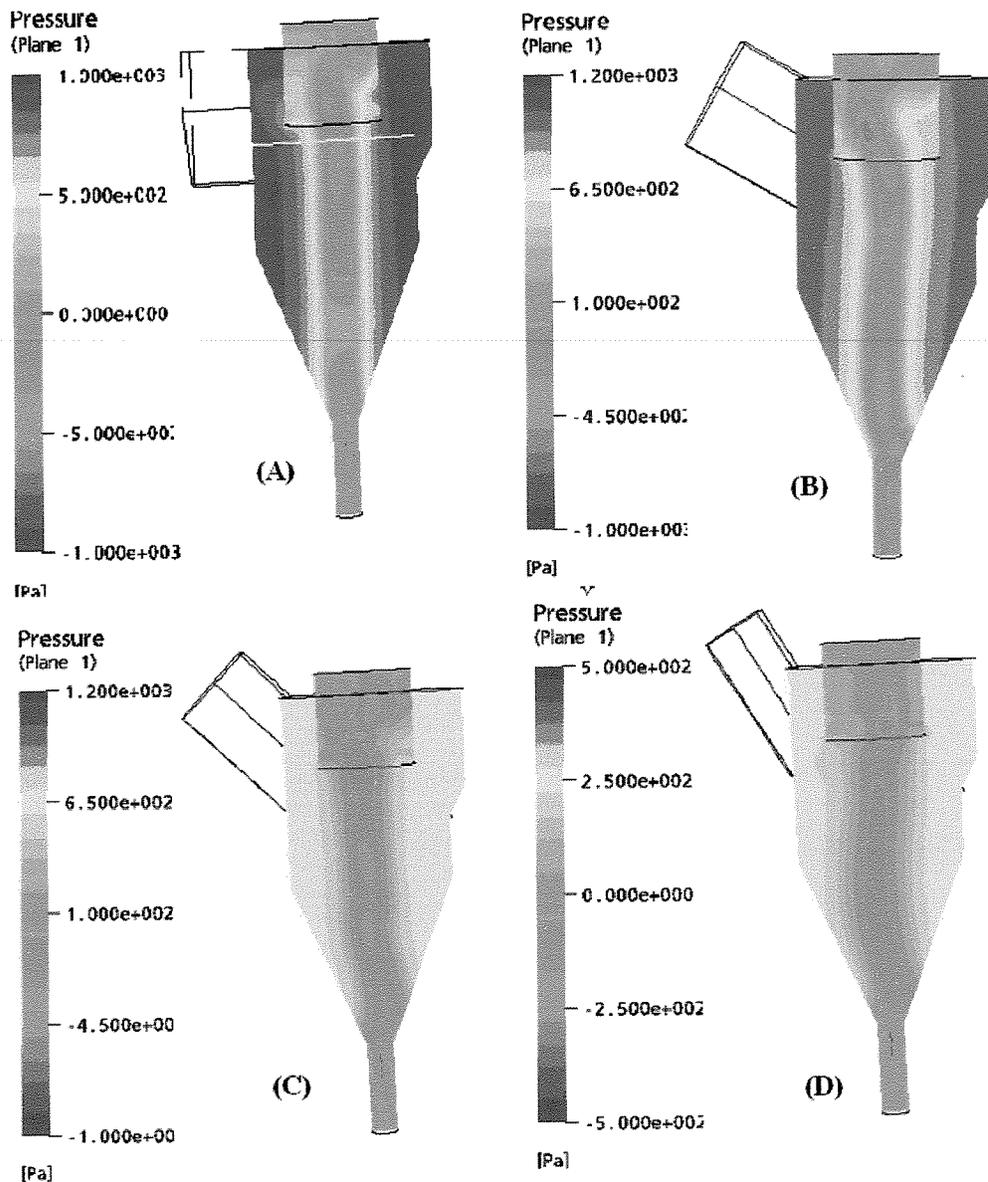


Figura 9.4: Mapeamento dos campos de pressão: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60° .

A análise da Figura 9.3 mostra que o efeito da entrada em voluta faz com que o escoamento seja assimétrico, conforme observado também por Peres (2002), observando-se ainda que o pico de velocidade tangencial obtido ultrapassa o dobro da velocidade de entrada do ar. Outra observação confirmada pela análise das Figuras 9.2 e 9.3 refere-se à influência do ângulo da seção de entrada sobre os picos de velocidade. O aumento do

ângulo de inclinação levou à redução destes picos, conforme discutido anteriormente. Porém, em todos os casos, as velocidades obtidas correspondem a valores maiores do que duas vezes maiores do que a velocidade de entrada. A velocidade axial do gás (Figuras 9.3) mostra que a região de alta velocidade de giro do escoamento se estende ao longo de todo o ciclone, respeitadas as variações decrescentes observadas à medida que o ângulo de inclinação aumenta. A análise das Figuras 9.2 e 9.4 mostra que a região de baixa pressão apresenta comportamento análogo ao da velocidade tangencial do gás. Isto também foi observado por Peres (2002), indicando que a reversão do escoamento não se dá de forma rápida. Os parâmetros da queda de pressão são apresentados e discutidos na seção a seguir, juntamente com os resultados do escoamento bifásico.

9.4- Simulação do Escoamento Gás-Sólido

Aqui são apresentados os resultados numéricos da predição do escoamento gás-sólido, tanto no ciclone industrial com entrada normal quanto nas propostas de inclinação da seção de entrada.

Nos experimentos numéricos deste estudo foram utilizadas as mesmas estratégias de solução aplicadas ao estudo do escoamento do gás. As condições operacionais estão listadas na Tabela 9.2 e reproduzem condições típicas usadas na indústria de cimento.

Tabela 9.2: Condições Operacionais dos casos em estudo. (Fonte: Peres, 2002))

Propriedades		
Fase Gás	Velocidade de entrada (m/s)	15,8
	Massa específica (kg/m ³)	0,3551
	Viscosidade (kg/ms)	0,000019
Fase Particulada	Diâmetro médio (µm)	26
	Velocidade de entrada (m/s)	15,8
	Massa específica (kg/m ³)	2740
	Razão de carga (g/m ³)	270
	Concentração volumétrica	0,000055

A Figura 9.5 apresenta o perfil radial da velocidade tangencial para o ciclone com entrada normal, na presença e na ausência de particulado.

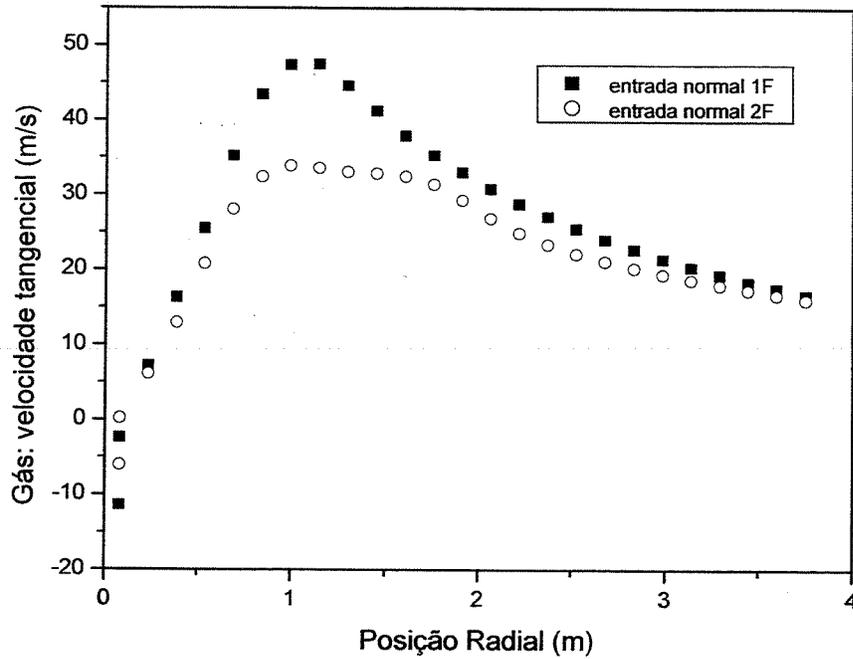


Figura 9.5: Distribuição da velocidade tangencial para os escoamentos do gás (1F) e gás-sólido (2F).

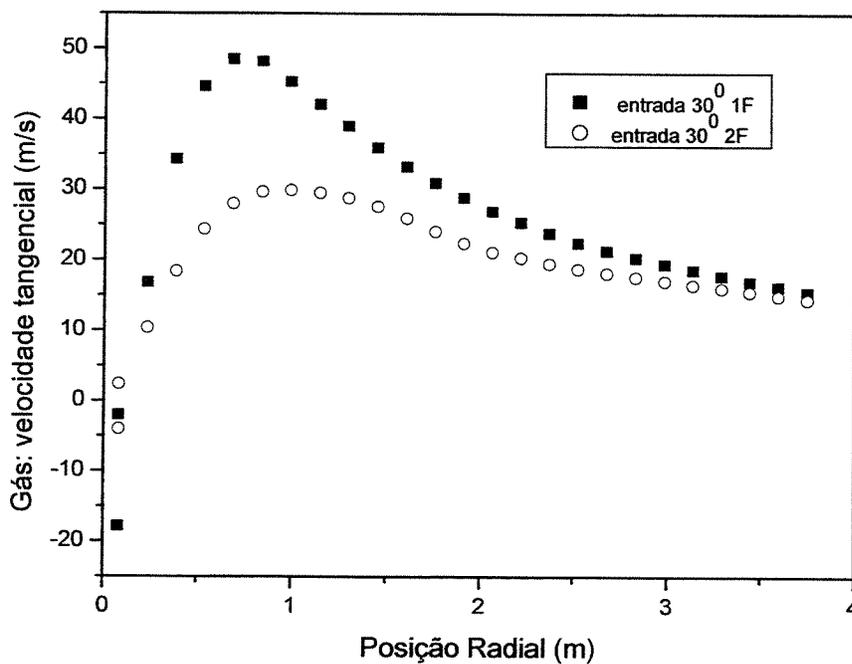


Figura 9.6: Distribuição da velocidade tangencial para o caso de inclinação de 30°.

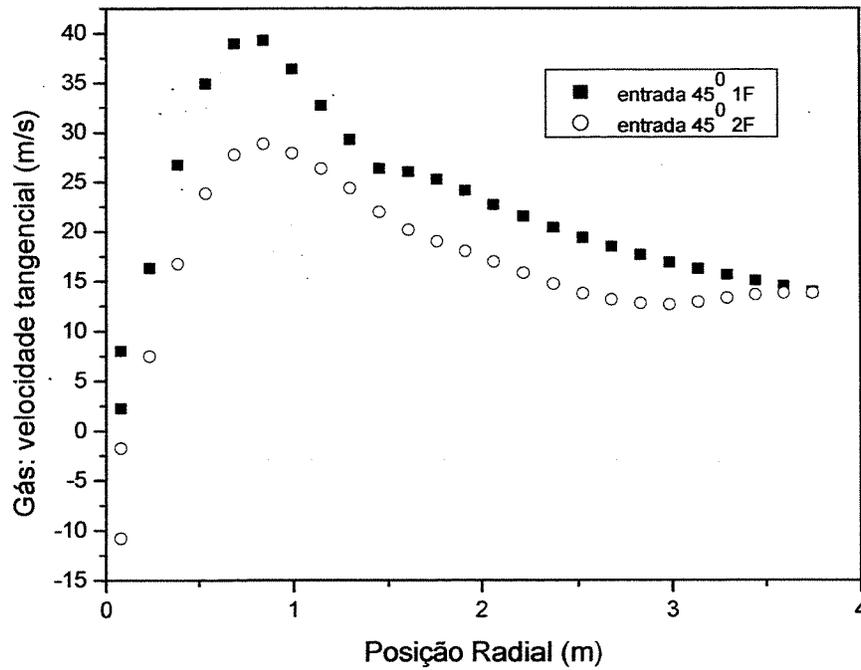


Figura 9.7: Distribuição da velocidade tangencial para o caso de inclinação de 45°.

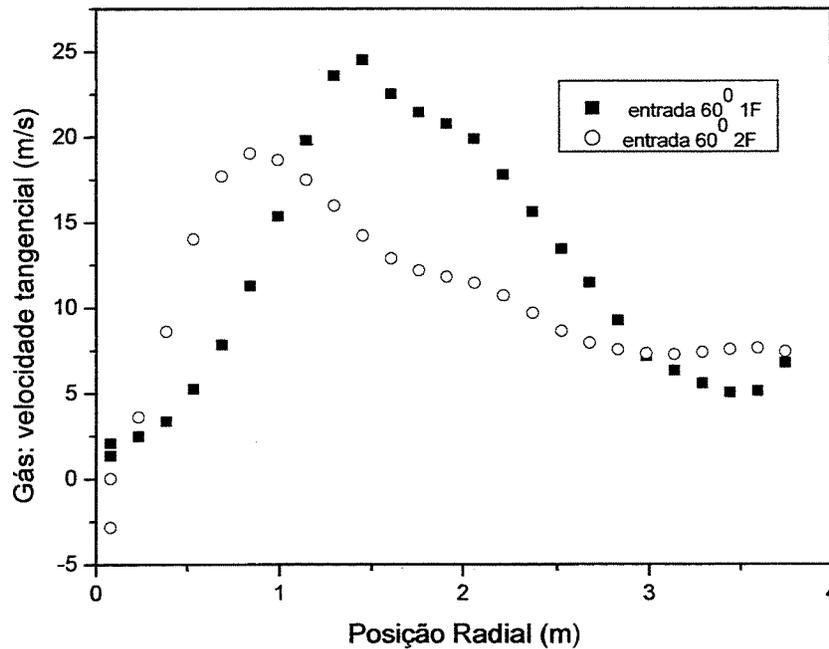


Figura 9.8: Distribuição da velocidade tangencial para o caso de inclinação de 60°.

É possível verificar, através da Figura 9.5, a influência da presença da fase sólida sobre a fase particulada, através da redução do pico de velocidade máxima, conforme observado por Peres (2002) e Bernardo e Mori (2004). O mesmo comportamento foi

observado para os casos em que se avaliou a inclinação da seção de entrada, conforme mostram as Figuras 9.6, 9.7 e 9.8 a seguir.

A Figura 9.9, na página a seguir mostra os perfis de distribuição da velocidade tangencial do gás no sistema gás-sólido, para todas as inclinações estudadas. Corrobora-se a observação de que o aumento do ângulo de inclinação causa uma redução mais acentuada da velocidade tangencial do gás.

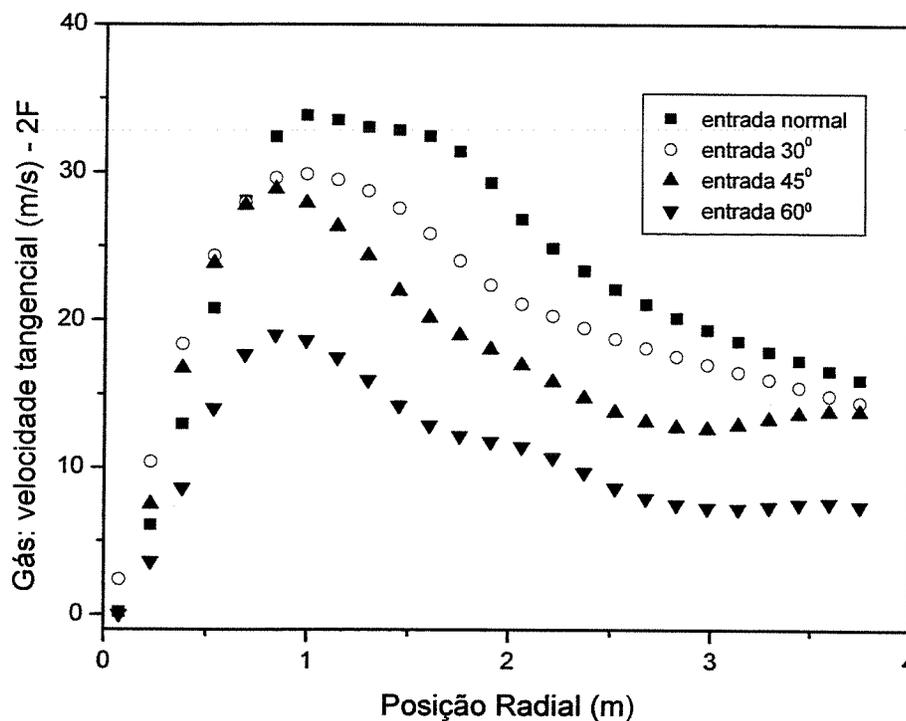
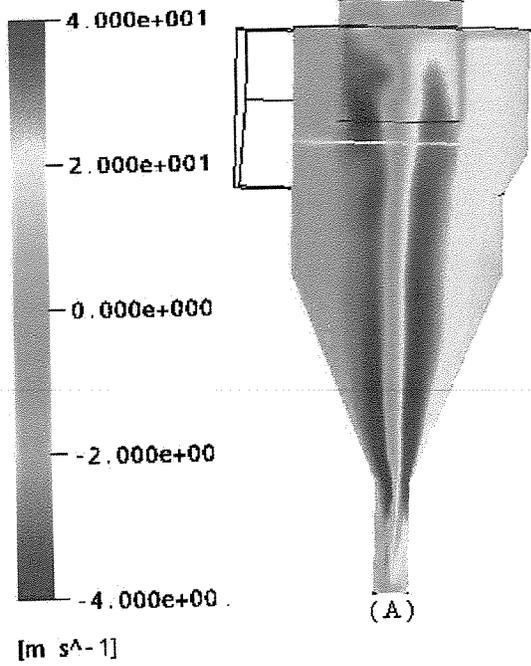


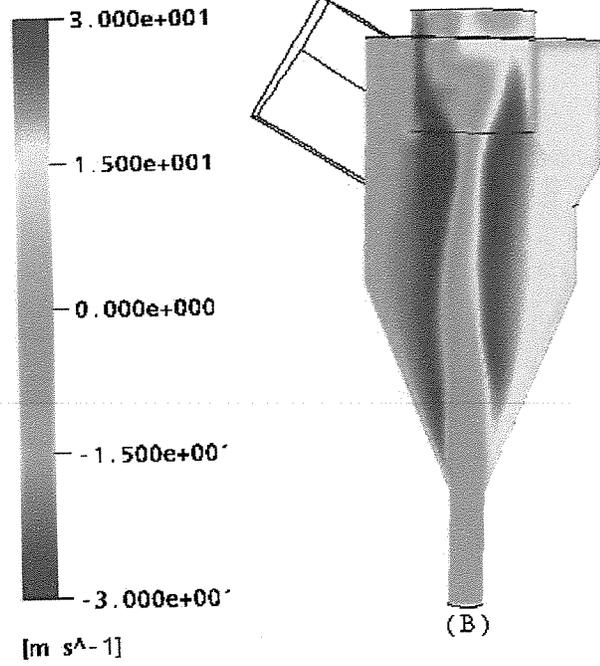
Figura 9.9: Distribuição da velocidade tangencial para todos os casos estudados.

Com o intuito de melhor compreender a influência da fase particulada sobre o escoamento da fase gasosa, apresentam-se a seguir (Figuras 9.10, 9.11 e 9.12) os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e de pressão.

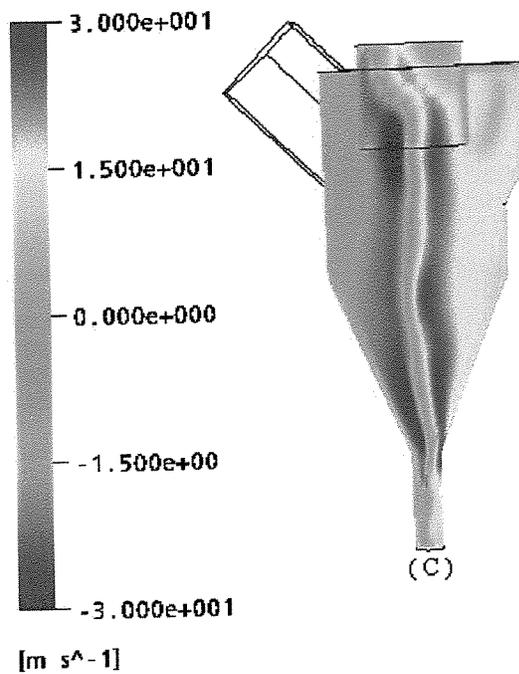
Air at 25 C. Velocity u
(Plane 1)



Air at 25 C. Velocity u
(Plane 1)



Air at 25 C. Velocity u
(Plane 1)



Air at 25 C. Velocity u
(Plane 1)

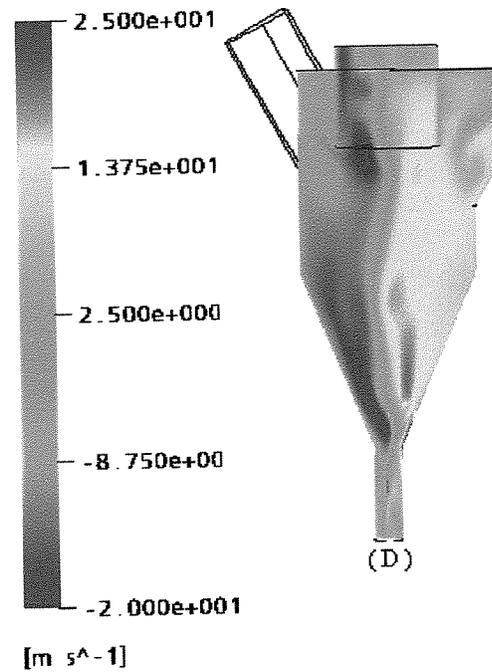
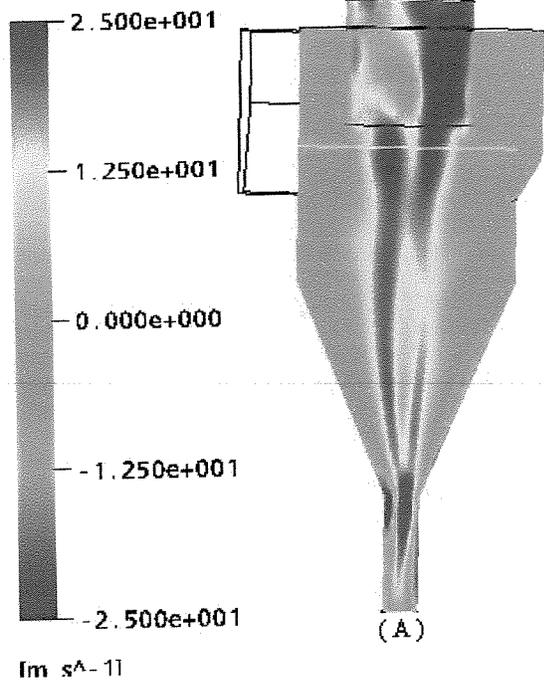
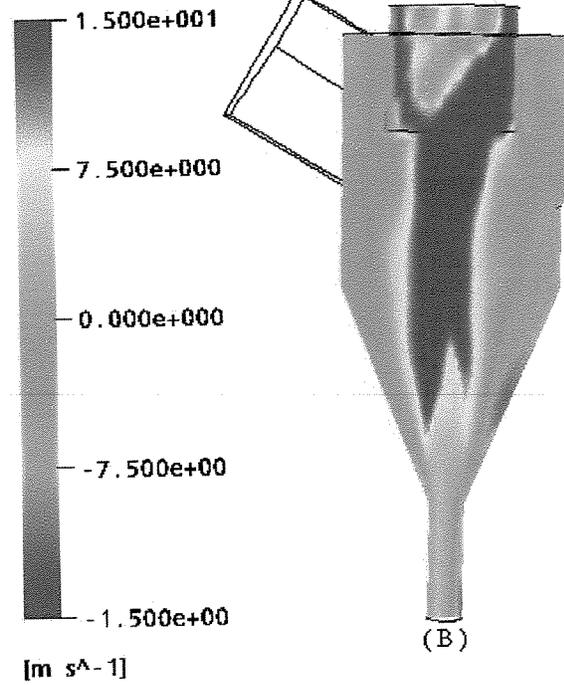


Figura 9.10: Mapeamento dos campos de velocidade tangencial no escoamento bifásico:
(A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30°, (C) 45° e (D) 60°.

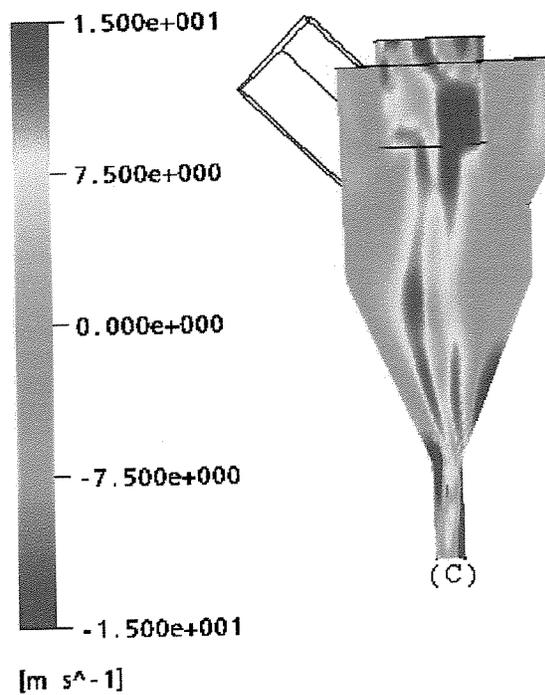
Air at 25 C. Velocity v
(Plane 1)



Air at 25 C. Velocity v
(Plane 1)



Air at 25 C. Velocity v
(Plane 1)



Air at 25 C. Velocity v
(Plane 1)

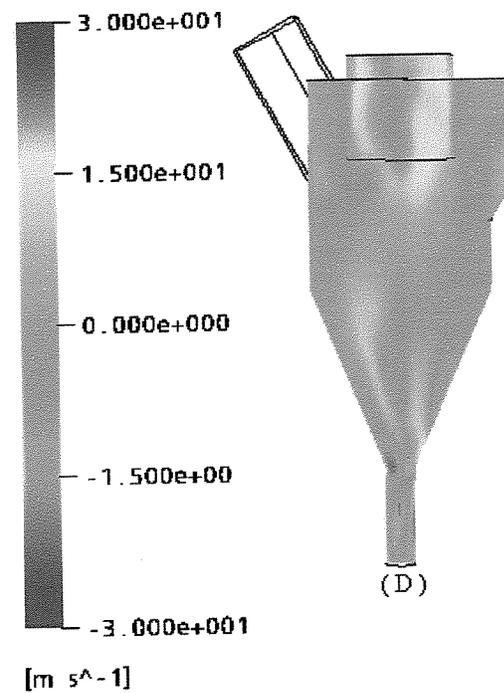


Figura 9.11: Mapeamento dos campos de velocidade axial no escoamento bifásico:
(A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60° .

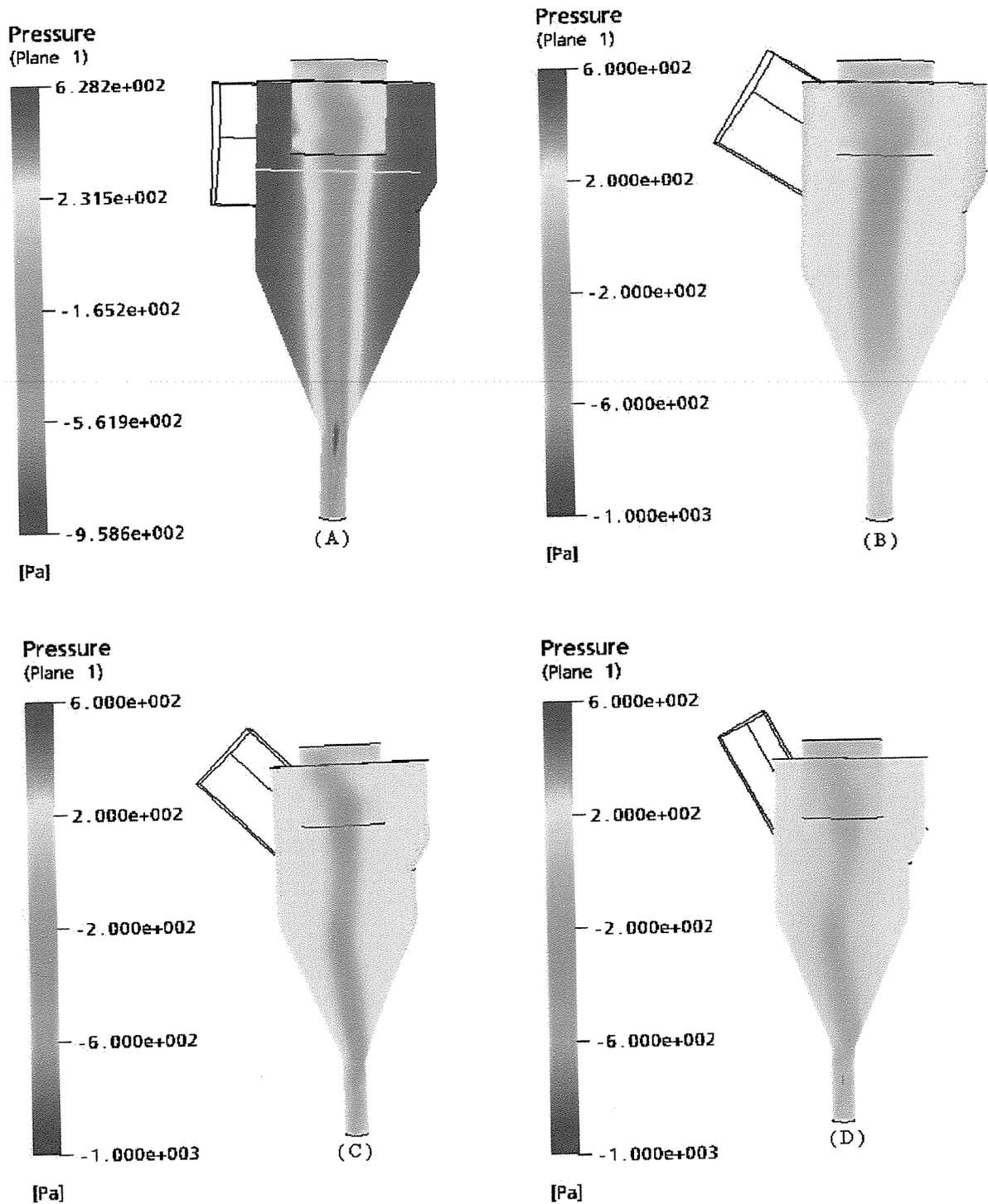


Figura 9.12: Mapeamento dos campos de Pressão no escoamento bifásico: (A) Entrada Normal; Entradas inclinadas de (B) 30° , (C) 45° e (D) 60° .

A inspeção das Figuras 9.9 e 9.10 evidencia, mais uma vez, a diminuição dos picos de velocidade, indicando ainda que a concentração de carga de sólidos presente na corrente

altera o perfil de velocidade da fase gasosa, conforme observado nos ensaios envolvendo escoamento gás-sólido em ciclone descritos nesta tese. Já a Figura 9.11 mostra que a velocidade axial tem seus maiores valores na região do tubo de saída do gás, e nas paredes do mesmo, conforme observado para estes casos no escoamento da fase gasosa apenas. Com relação aos campos de pressão (Figura 9.12), percebe-se a relação entre a região de baixa pressão e a reversão do escoamento do gás, ou seja, a região de menor pressão encontra-se no interior do tubo de saída do gás. Percebe-se ainda uma estreita região de baixa pressão próxima ao eixo de simetria do ciclone e esta região se estende ao longo de todo o ciclone.

9.4-1-Parâmetros de Desempenho dos Ciclones

Os resultados numéricos obtidos para os parâmetros globais de queda de pressão e eficiência de coleta para o ciclone com entrada normal e com entradas inclinadas são mostrados na Tabela 9.3.

Tabela 9.3: Resultados numéricos de Queda de Pressão e Eficiência de Coleta.

Caso Estudado	Queda de Pressão (Pa)		Eficiência de Coleta (%)*
	Monofásico	Bifásico	
Entrada Normal	522,95	405,42	54,4
Inclinação 30 ⁰	464,14	257,05	55,1**
Inclinação 45 ⁰	325,10	235,48	77,2
Inclinação 60 ⁰	212,22	200,11	68,7
OPERAÇÃO INDUSTRIAL			51

*Valores médios para a grandeza.

**Primeiro valor (t = 4s)

Pela análise da tabela acima, percebe-se que houve diminuição da queda de pressão ao se passar do sistema monofásico para o sistema bifásico, associando-se este efeito à presença da fase particulada no escoamento, como também a proposta de inclinação da seção de entrada, já que a redução também foi observada nestes casos. A redução mostrou-se mais acentuada à medida que o ângulo de inclinação aumentava. Esta é uma característica importante e que deve ser levada em consideração quando se busca o ganho energético no processo, uma vez que a taxa de redução da queda de pressão do sistema, relacionando a entrada normal e as opções de inclinação da mesma, é bastante significativa.

Quanto à eficiência de coleta destes ciclones, observou-se que a inclinação da seção de entrada proporcionou rendimentos melhores do que aqueles obtidos para o caso da entrada normal. Especificamente, a proposta de inclinação de 45° proporcionou a melhor performance. Porém, observou-se que este aumento não segue uma relação linear, ou seja, maiores ângulos não representam maiores valores para a performance. Esta observação é corroborada nos estudos apresentados no capítulo 08, onde foi observado que a inclinação de 45° forneceu resultados melhores do que o ciclone com entrada normal utilizado no estudo, e que a inclinação de 30° não mostrou um aumento significativo da eficiência de coleta, tal como observado neste caso. Os resultados parecem indicar a existência de um ângulo “ótimo” para a obtenção de melhores eficiências, a partir do qual a eficiência reverteria sua tendência de aumento. Nos casos estudados, este ângulo parece situar-se entre 30° e 60° , estando, porém, mais próximo do limite inferior do que do limite superior.

O ciclone industrial com entrada normal apresenta uma eficiência de coleta de 51% quando em operação na indústria de cimento. Este valor é necessário para a corroboração dos dados de eficiência de coleta apresentados na Tabela 9.3. Não há informações referentes à queda de pressão deste ciclone industrial em operação real, o que impede a comparação deste parâmetro com os dados obtidos nos experimentos numéricos.

Conforme observado por Meier *et al.* (2002) e Peres (2002), há uma tendência do escoamento em atingir um estado estacionário periódico instável para partículas na faixa de diâmetro compreendida entre 15 e 25 μm . Segundo Peres (2002) a hipótese levantada é que este estado seja resultado do balanço de forças envolvendo a inércia da partícula e a força de arraste que tende a atrair as partículas no sentido das paredes para o escoamento vorticial. Este comportamento também foi observado nos casos simulados aqui (entrada normal e entradas inclinadas), com o diâmetro médio tendo sido de 26 μm . De acordo com as observações feitas por Meier *et al.* (2002) e Peres (2002), a existência deste estado

estacionário periódico instável pode ser o responsável pelo fenômeno de avalanche de sólidos verificado no processo industrial de cimento. Ou seja, há um acúmulo de sólidos em certas regiões internas próximas à parede do ciclone, levando a uma posterior descarga repentina de sólidos, fechando-se um período de acúmulo de sólidos e iniciando-se outro (Peres, 2002)

Pelo motivo exposto acima, tem-se na Tabela 9.3 valores médios para a eficiência de coleta, pois medidas tomadas a cada intervalo de tempo mostravam queda da eficiência e posterior aumento da mesma, provavelmente no instante da avalanche (situação, na qual a eficiência calculada se mostrava muito superior a 100%). O tempo total simulado de 11 s captou tais fenômenos. Porém, um tempo maior de simulação seria necessário para a confirmação destas observações, uma vez que se trata de ciclones com dimensão industrial.

9.5- Análise da Trajetória das Partículas para os Ciclones Estudados

Com o intuito de avaliar o comportamento das partículas sólidas no interior dos ciclones inclinados em 30° , 45° e 60° , e a partir daí verificar a influência destas inclinações frente à trajetória das mesmas, propôs-se o mapeamento do caminho percorrido por um conjunto aleatório de partículas, injetadas na superfície de entrada de cada um dos equipamentos.

As Figuras de 9.13 a 9.16, apresentadas a seguir, mostram a trajetória de partículas no interior dos ciclones em estudo neste capítulo. Nestas Figuras, a notação “Tupertine” representa o nome dado à partícula sólida alimentada nos ciclones.

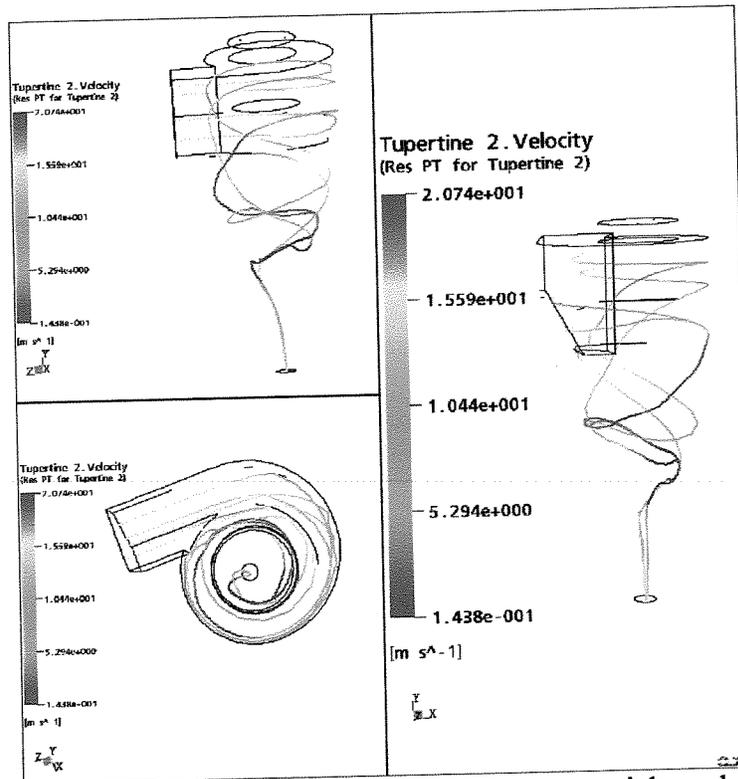


Figura 9.13: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada normal.

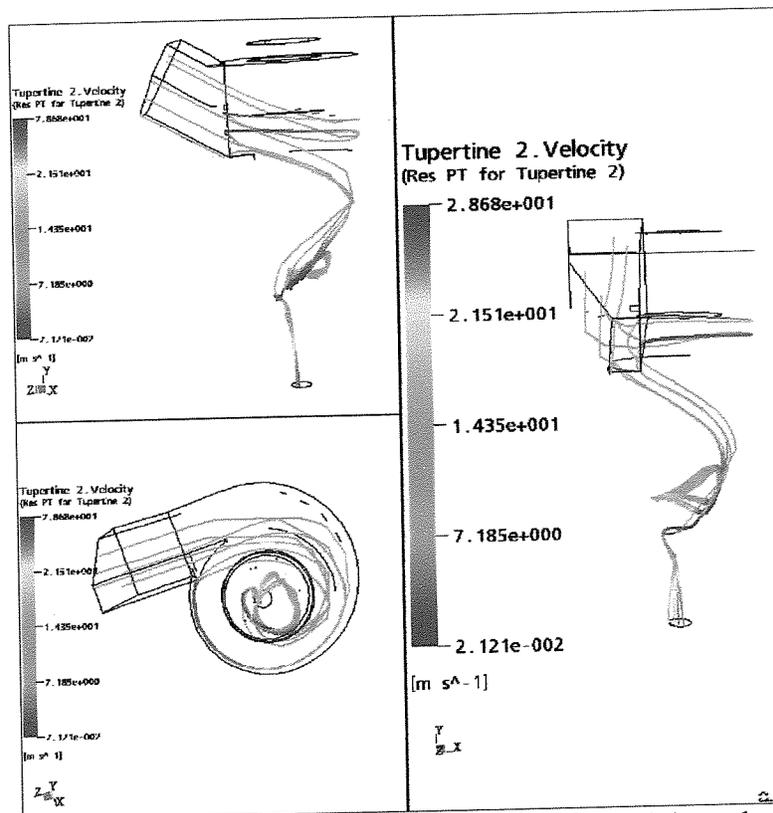


Figura 9.14: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada inclinada em 30° .

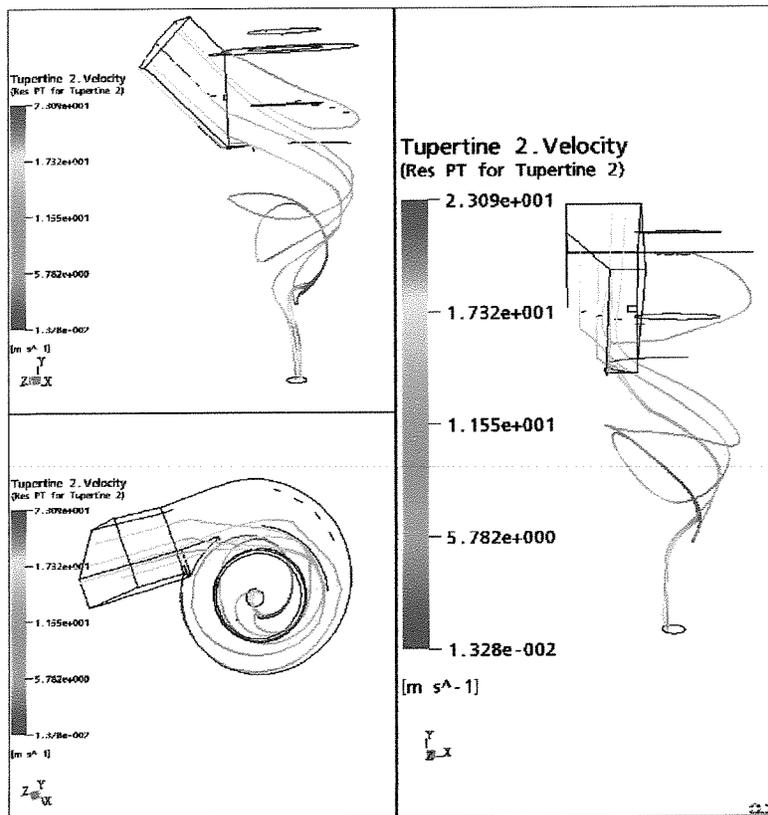


Figura 9.15: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada inclinada em 45° .

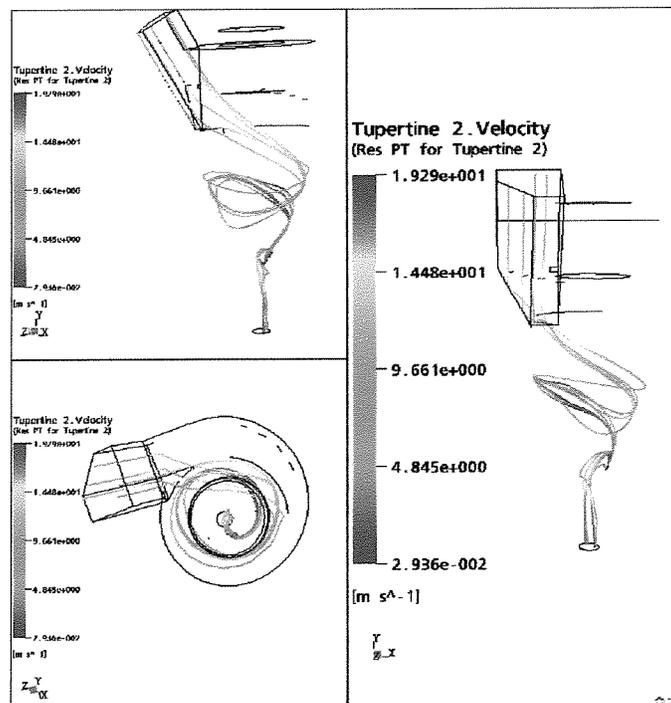


Figura 9.16: Mapeamento da trajetória das partículas para o ciclone de características industriais, com entrada inclinada em 60° .

Comparando-se as Figuras 9.15 a 9.17 com a Figura 9.14, percebe-se que o aumento do ângulo de inclinação gerou uma alteração da trajetória das partículas no sentido descendente, reduzindo a área de giro destas partículas na região cilíndrica do corpo do ciclone. Em virtude disto, o tempo de residência destas partículas diminuiu, o que pode ser um indicativo da relação encontrada entre o aumento do ângulo de inclinação da seção de entrada e a redução da queda de pressão dos ciclones (vide Tabela 9.3). A Figura 9.18, a seguir, mostra a trajetória das partículas para todos os casos estudados.

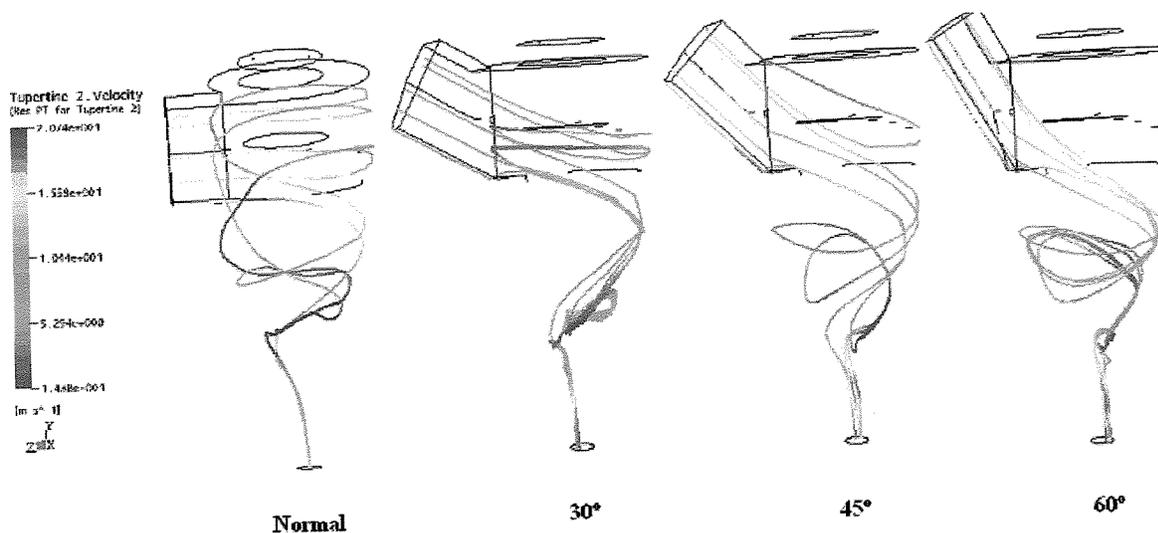


Figura 9.17: Comparação entre as trajetórias das partículas para os vários casos estudados.

O tempo de residência para o ciclone normal é superior àquele dos ciclones inclinados, reduzindo à medida que o ângulo de inclinação aumenta. Uma vez que as partículas passariam menos tempo dentro do equipamento, quando da inclinação da seção de entrada, uma menor quantidade de energia é necessária para mantê-las no escoamento no interior dos ciclones, quando comparado ao ciclone com entrada normal. Esta seria, então, uma possível razão para a diminuição da queda de pressão observada para os maiores ângulos de inclinação estudados.

Conforme se observa na Figura 9.17, o aumento do ângulo de inclinação levou ao aparecimento de regiões onde não são observados movimentos de partículas, as quais situam-se na parte superior da seção cilíndrica do ciclone, oposta à seção de entrada. A partir desta observação, então, buscou-se avaliar se tais regiões poderiam levar à formação

de zonas de recirculação, as quais levariam a retenção de eventuais partículas sólidas no interior do equipamento, levando a problemas tais como erosão do equipamento. A Figura 9.18 mostra a trajetória das partículas juntamente com campos vetoriais para o perfil de velocidades radiais na região cilíndrica do ciclone.

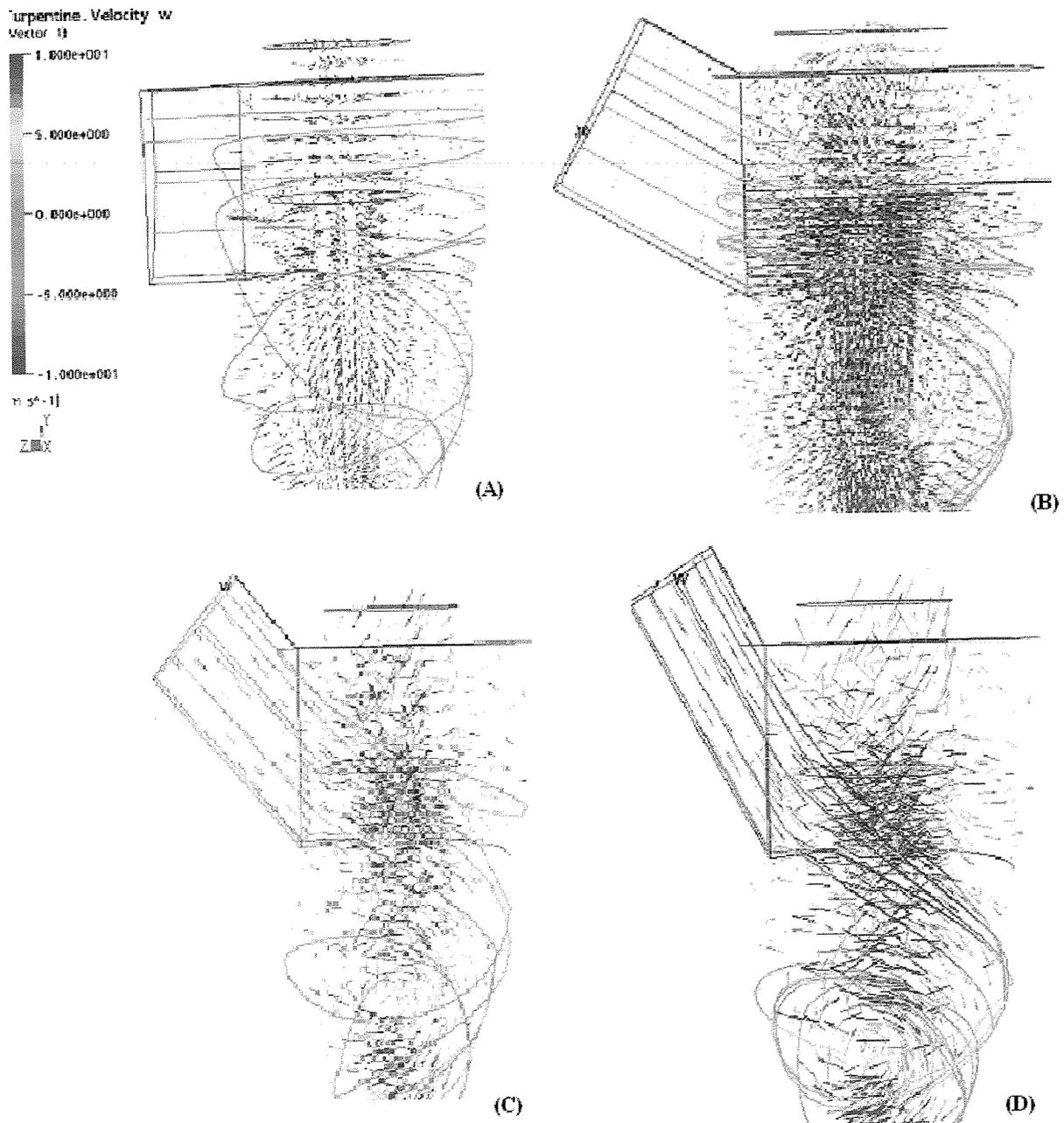


Figura 9.18: Avaliação da trajetória da partícula e do perfil vetorial de velocidade radial do sólido para os ciclones: (A) entrada normal.; (B) inclinação de 30°; (C) inclinação de 45°; (D) inclinação de 60°.

A análise dos perfis vetoriais da velocidade radial mostrou não haver zonas de recirculação na região superior direita da seção cilíndrica do ciclone, que compreende as regiões nas quais o movimento das partículas sólidas vai diminuindo, em função do aumento do ângulo de inclinação. Com isso, o efeito de recirculação de sólidos parece não existir nestas áreas. Infelizmente, a impressão da Figura 9.18 não permitiu uma visualização, a contento, das características anteriormente descritas. Porém, tais observações puderam ser extraídas a partir da análise visual dos campos vetoriais na tela do programa CFX POST.

Quando comparado ao comportamento das partículas estudadas no ciclone inclinado descrito no Capítulo 08, percebe-se que no caso atual foi possível avaliar toda a trajetória da partícula, desde a seção de entrada até a coleta da mesma, na saída inferior do ciclone. No capítulo 08, levantou-se como uma das hipóteses para a permanência da partícula no interior do ciclone o fato de a mesma, naquele caso, ter um diâmetro bastante reduzido ($10\ \mu\text{m}$), o que facilitaria a captação da partícula dentro do ciclone, aumentando o seu tempo de residência. No caso atual, o diâmetro médio das partículas é de $26\ \mu\text{m}$, correspondente a um valor 2,6 vezes maior do que o anterior, daí ser esta uma hipótese para o fato de ter sido possível captar toda a trajetória de um conjunto de partículas aleatórias alimentadas na seção de entrada do ciclone.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES

*“De tudo ficaram três coisas:
A certeza de que estava sempre começando,
A certeza de que era preciso continuar
E a certeza de que seria interrompido antes de terminar.*

*Fazer da interrupção um caminho novo,
Fazer da queda, um passo de dança,
Do medo, uma escada,
Do sonho, uma ponte,
Da procura, um encontro.”
(Fernando Sabino)*

10.1- Apresentação

Experimentos numéricos em ciclones com geometria tridimensional foram realizados através das técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD). As simulações foram baseadas em estudos de casos disponíveis na literatura científica, abrangendo dois tipos de escoamento: monofásico (gás) e bifásico (gás-sólido). Dois pacotes computacionais, FLUENT e CFX, realizaram as simulações, que foram delineadas a partir de condições de contorno e de esquemas numéricos de interpolação descritos no decorrer deste trabalho.

O ponto de partida do trabalho abrangeu o estudo do escoamento monofásico. A partir destes resultados, foram avaliadas situações envolvendo o escoamento gás-sólido, com ênfase em pontos tais como a influência da presença da fase sólida no escoamento da fase gasosa, e as características referentes ao desempenho do ciclone.

A ênfase na busca pela melhoria dos parâmetros de eficiência de ciclones levou-nos a estudar a influência em se promover inclinações de 30°, 45° e 60° na seção de entrada, em relação ao corpo do ciclone. Para estes casos, foram avaliados tanto o escoamento monofásico quanto o bifásico, aplicados a ciclones de bancada e também ciclones com características industriais, testando alguns modelos de turbulência e sua relação no desempenho dos ciclones. Adicionalmente, dentro da linha da busca pelo aumento da eficiência do equipamento, avaliou-se a influência do diâmetro do finder sobre a eficiência do ciclone.

10.2- Conclusões

A seguir, apresentam-se as principais conclusões extraídas neste trabalho.

1) Perfis de Hardware e de Software

- As técnicas da Fluidodinâmica Computacional (CFD) se mostraram aliadas poderosas no sentido de se obter soluções consistentes e em menor tempo para os escoamentos monofásicos e bifásicos em ciclones. Fazendo uso do método dos volumes finitos, de algoritmos de acoplamento pressão velocidade do tipo SIMPLEC e esquemas de interpolação UPWIND, os pacotes FLUENT e CFX se mostraram ferramentas essenciais na busca de respostas mais contundentes na fluidodinâmica do complexo escoamento dos ciclones. À medida que recursos computacionais se tornam disponíveis (tanto em hardware quanto em software), a simulação de escoamentos complexos torna-se mais viável, por reduzir o esforço computacional requerido e o tempo para se obter estes resultados.

2) Escoamento Monofásico

- O modelo aplicado para o estudo do escoamento do gás em ciclones permitiu prever os principais fenômenos fluidodinâmicos que caracterizam este fenômeno, tais como: preservação de vorticidade, reversão de escoamento, zonas de recirculação de fluido, perfis de velocidade (radial, tangencial e axial) e queda de pressão. Todos

os estudos de caso avaliados apresentaram uma boa concordância entre os dados experimentais e aqueles obtidos através dos experimentos numéricos. Estes resultados vêm reforçar as idéias levantadas em trabalhos anteriores e também trazer sua contribuição nesta área.

3) Escoamento Bifásico

- A hipótese de uma modelagem envolvendo viscosidade constante e com baixo valor para a fase sólida representou satisfatoriamente o escoamento gás-sólido em fase diluída nos ciclones. Foi possível prever a influência da presença da fase sólida sobre o escoamento da fase gasosa, através da atenuação do escoamento vorticial, da predição dos perfis de velocidade tangencial e da redução da queda de pressão. Todas estas informações foram corroboradas pelos dados experimentais disponíveis.
- A performance dos ciclones estudados, caracterizada pela eficiência de coleta, também complementa o leque de sucessos do trabalho. Ao mesmo tempo, abre uma janela para a necessidade de obtenção de dados experimentais que tornem possível a validação de modelos propostos. A pouca disponibilidade de dados torna restrita a validação de resultados numéricos.

4) Modificações Geométricas em ciclones

- A proposta de avaliar a influência da mudança do ângulo da seção de entrada em 30° e 45° de um ciclone com dimensões de bancada mostrou bons resultados tanto nas características fluidodinâmicas do escoamento interno (gás e gás-sólido) quanto na redução da queda de pressão e aumento eficiência de coleta, apontando ser este um caminho a ser explorado.
- Dentro da linha de modificações geométricas do equipamento, a variação do diâmetro do finder também propicia considerável aumento na eficiência de coleta de ciclones.

- Os modelos DES e LES aplicados se mostraram bons na predição de características do escoamento, como as zonas de formação de turbilhões e sua relação com a eficiência do processo. Com isso, novas perspectivas se abrem para esclarecer o complexo problema da turbulência no interior do ciclone.
- A proposta de avaliação da influência de inclinação da seção de entrada em ângulos de 30°, 45° e 60° em relação ao corpo do ciclone, partindo de um ciclone de dimensões industriais, mostrou-se uma alternativa com considerável potencial para melhora nos parâmetros de performance de ciclones, fato amparado pela redução significativa da queda de pressão e pelo aumento da eficiência de coleta. Associando-se os resultados de queda de pressão e eficiência de coleta obtidos neste estudo, as características do escoamento em questão permitiram avaliar com mais segurança e profundidade os parâmetros fluidodinâmicos do processo.

Espera-se que este trabalho, no campo de sua atuação científica, tenha contribuído tanto para o levantamento de informações quanto para o aprofundamento do debate constante que rege a busca da melhoria de operação dos ciclones, embasada na elucidação das questões referentes à fluidodinâmica do seu processo. Particularmente, a experiência adquirida vai além do conhecimento técnico absorvido ao longo deste doutoramento. Ela se traduz na aquisição de um espírito crítico, absorção de uma metodologia de trabalho científico e na formação de um perfil de trabalho em equipe, vital para o desenvolvimento de pesquisas em todos os âmbitos e áreas do conhecimento.

Sugestões para Trabalhos Futuros

- Selecionar e estudar novos casos de escoamento gás-sólido para aprofundamento da relação de influência da fase sólida na fase gasosa em simulações tridimensionais.
- Usar casos reais de escoamentos em ciclones, tais como os ciclones de unidades industriais, levantando dados experimentais que poderiam corroborar os experimentos numéricos.
- Avaliar novos modelos de turbulência na fluidodinâmica do escoamento de ciclones.
- Implementar outros parâmetros do modelo LES, além da viscosidade do sólido e do gás já apresentadas neste trabalho, com o intuito de obter mais informações acerca das características do escoamento.
- Prosseguir o estudo da influência da inclinação da seção de entrada do ciclone, porém, usando ângulos diferentes do proposto neste trabalho. Avaliar, ainda, outras modificações, como o diâmetro do finder, na performance do equipamento.
- Verificar a adequação de um trabalho experimental envolvendo ciclones inclinados, para levantamento de dados experimentais desta proposta, de modo a verificar os resultados alcançados nos experimentos numéricos.
- Realizar simulações com maiores valores de tempo real, para a proposta de inclinação de sua seção de entrada, no que se refere à eficiência de coleta do ciclone com características industriais, um tempo maior de simulação dos escoamentos bifásicos pode ser necessário, para que se tenha dados mais concretos quanto ao fenômeno do estado estacionário periódico instável observado no caso do ciclone com características industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, R. M., *Fundamentals of Cyclone Design and Operation*. Proceedings of Australian. Inst. Min. Metall. (New Series), p 152-153, 203, 1949.
- AVEROUS, J., FUENTES, R. *Advances in the Numerical Simulation of Hydrocyclones Classification*. Canadian Metallurgical Quartely, v.36, n.05, p. 309-317, 1997.
- BARTH, W. *Berechnung und Auslegung von Zyklonab scheidern, Brenstoff-Warmekraft*, v. 8, n. 01, p. 01-09, 1956.
- BASKAKOV, A.P., DOLGOV, V.N., GOLDOBIN, Y.M., *Aerodynamics and Heat Transfer in Cyclone with Particle-laden Gas flow*. Experimental Thermal and Fluid Science, v. 3, p. 597-602, 1990.
- BEECKMANS, J.M., MORRIN, B. *The Effect of Particulate Solids on Pressure Drop Across a Cyclone*. Powder Technology, v. 52, p. 227-232, 1987.
- BENTA, E. S. *Estudo da secagem de sabugo de milho em ciclone*. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 116p. Dissertação (Mestrado), 1997.
- BERNARDO, S., PERES, A.P., MORI, M. and HUZIWARA, W.K., *Influence of Inlet section Angle on Cyclones Gas Flow Fluid Dynamics*. Anais do XXIV CILAMCE – Congresso Ibero Latino-Americano em Métodos Computacionais em Engenharia. Ouro Preto- Brazil, 2003.
- BERNARDO, S., MORI, M.; *Computational Study of Cyclone Flow Fluid Dynamics using a Different Inlet Section Angle*. Anais do XV COBEQ- Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Curitiba-PR, 2004.

- BRICOUT, V., LOUGE, M.Y., *Measurements of cyclone performance under conditions analogous to pressurized circulating fluidization*. Chemical Engineering Science v.59, p. 3059-3070, 2004.

- BOUSSINESQ, J., *Théorie de L'écoulement Tourbillant*. Mém. Présentés par Divers Savant Acad. Sci. Inst. Fr., v. 23, p. 46-50, 1877.

- BOYSAN, F., AYERS, W. H., SWITHENBANK, J., *A fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design*. Institution of Chemical Engineers, v 60, p. 222-230, 1982.

- CARVALHO, L.M., Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1993.

- CEBECI, T., SMITH, A.M.O., *A Finite-Difference Solution of the Incompressible Turbulent Boundary-Layer Equations by na Eddy Viscosity Concept*. Stanford Conf. Comp. of Turbulent Boundary Layer; Stanford University Press, p. 346-355, Stanford, California, 1968;

- CHOW, P., CROSS, M., PERCILEOUS, K., *A Natural Extension of the Conventional Finite Volume Method into Polygonal Unstructured meshes for CFD Application*. Applied Mathematical Modelling, v.20, p. 170-183, 1996.

- CLIFT, R., GHADIRI, M., HOFFMAN, A C. *A Critique of Two Models for Cyclone Performance*. AIChE Journal, v. 37, n.2, February, p. 285-289, 1991.

- CORRÊA, J. L. G., RIOS, M. T. T., SILVA, M. A., NEBRA, S. A. *Estudo do tempo de residência de particulados em ciclone*. In: Encontro sobre escoamento em meios porosos, 28, *Anais do XXVIII ENEMP*, Teresópolis, RJ, p. 165-172, 2000.

- CORRÊA, J. L. G., SILVA, M. A., NEBRA, S. A., *Experimental and theoretical study of particle residence time in a cyclonic chamber*. Progress in Transport Phenomena Ed. Dost, S., Struchtrup, H., Dincer, I. *The 13th International Symposium on Transport Phenomena*, Elsevier, Victoria, B.C., Canada, p. 63-67, ISBN 2-84299-391-8, 2002.
- CORRÊA, J.L.G., *Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos*. Tese de Doutorado - UNICAMP, Campinas-SP, 2003.
- CRAWFORD, M., *Air Pollution Control Theory*, McGraw-Hill, 1976.
- CREMASCO, M. A. *Estudo sobre o Escoamento Gás-Partículas em um Reator Ciclônico*. Tese de Doutorado-UNICAMP, Campinas-SP, 199p, 1994.
- CRISTEA, E.D., MALFA, E., *3D Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln PreHeater Top Cyclone*, *Anais of Fluent European User's Group Meeting*, Harrogate, U.K, 18pp, 9-10 June, 1994.
- CRISTEA, E. D , COGHE, A. , *3-D Numerical Computation and Validation of High Solid Loading Flow Inside a Gas Cyclone Separator*, *Proceedings of FEDSM' 98: ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting* Washington, DC, 7pp, 1998.
- DALY, B.J., HARLOW, F.H. *Transport Equations in Turbulence*. *Physics Fluids* 13, p. 2635-2639, 1970.
- DIBB, A. *Comportamento Fluidodinâmico do Ciclone em Diferentes Geometrias*. Dissertação de Mestrado, FEQ/ UNICAMP, Campinas, 63p., 1997.
- DIRGO, J., LEITH, D. *Performance of Theoretically Optimised Cyclones*. *Filtration and Separation*, March/April, p. 119-125, 1985.
- DONALDSON, C.duP., *Calculations of Turbulent Shear Flows for Atmospheric and vortex Motions*. *AIAAJ*, 10, p 04-12, 1972.

- DUGGINS, R.K., FRITH, P.C.W., *Turbulence Anisotropy in Cyclones*. Filtration and Separation, p. 394–397, Nov-Dec, 1987.
- DYAKOWSKY, T., WILLIAMS, R.A., *Modelling Turbulent Flow Within a Small-Diameter Hydrocyclone*. Chemical Engineering Science, v. 48, n. 6, p. 1143-1152, 1993.
- FASSANI, L. F. *Subsídios ao Estudo do Efeito da Concentração de Sólidos na Perda de Pressão e no Rendimento de Coleta de Ciclones*. Dissertação de Mestrado, FEM/UNICAMP, Campinas, 68p., 1997.
- FERZIGER, J. H., *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Ed. Springer, New York, NY, 357p, 1996.
- GABRA, M., PETERSSON, E., BACKMAN, R., KJELLSTRÖM, B. *Evaluation of cyclone gasifier performance for gasification of sugar cane residue – Part 1: gasification of bagasse*. Biomass and Bioenergy, v.21, p. 351-369, 2001.
- GIDASPOW, D., *Multiphase Flow and Fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions*. Academic Press, Boston, USA, 467p, 1994.
- GREGG, W.W., *High Efficiency Cyclones for Powder Processing Applications*, Adv. Filtration and Separation Technology, v. 9, p. 240, 1995.
- GRIFFITHS, W.D., BOYSAN, F., *Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modeling of Performance of a Number of Cyclone Samplers*. Journal of Aerosol Science, v. 27, n. 2, p 281-304, 1996.
- HANJALIC, K., LAUNDER, B.E. *A Reynolds Stress Model of Turbulence and its Application to thin Shear Flows*. J. Fluid Mechanical, v.53, p 593-610, 1972.
- HEINZE, C. *A new cyclone dryer for solids particles*. Ger Chem. Eng., v. 7, (4), p. 274-279, 1984.

- HINZE, J.O., *Turbulence*, Ed. McGraw-Hill Book Co., 2nd edition, New York, 1975.

- HOEKSTRA, A.J., DERKSEN, J.J., van Den AKKER, H.E.A., *An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones*. Chemical Engineering Science, v. 54, p. 2055-2065, 1999.

- HOFFMANN, A.C., ARENDS, H., SIE, H. *An Experimental Investigation Elucidating the Nature of the Effect of Solids Loading on Cyclone performance*. Filtration and Separation, May/June, p. 188-193, 1991.

- HOFFMANN, A.C.; VAN SANTEN, A., ALLEN, R.W.K., *Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones*. Powder Technology, v. 70, p. 83-91, 1992

- HOFFMANN, A.C., STEIN, L.E., *Gas Cyclones and Swirl Tubes – Principles, Design and Operation*. Ed. Springer, NY, 334 pp., 2004.

- HULLIN, L., GIDASPOW, D., *Hydrodynamics of Binary Fluidization in a Riser CFD Simulation using Two Granular Temperatures*. Chemical Engineering Science 58, 3777 -3792, 2003.

- JO, Y., TIEN, C., RAY, M.B., *Development of a Post Cyclone to Improve the Efficiency of Reverse Flow Cyclones*, Powder Technology, n.113, p. 97-108, 2000.

- KIM, J. C., LEE, K.W., *Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones*. Aerosol Science Technology, v. 12, p. 1003-1015, 1990.

- LAPPLE, C.E. *Process Use Many Collector Types*. Chemical Engineering, May, p. 144-151, 1951.

- LAUDER, B.E. and SPALDING, D.B. *The Numerical Computation of Turbulent Flows*. Comp. Meth. Applied Mech. Eng., v 3, p. 269-289, 1974.

- LAUDER, B.E., REECE, G.J., RODI, W., *Progress in the Development of a Reynolds-stress Turbulence Closure*. Journal of Fluid Mechanics, v. 68, p. 537-566, 1975.
- LEITH, D., LICHT, W. *The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors: A New Theoretical Approach*. AIChE Symp. Ser., n.126, p. 196-206, 1972.
- LEITH, D. *Cyclones*, Handbook of Powder Technology, capítulo 16. Editores: Fayed, M.E. and Ottenm, L.; Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1984.
- LITTLEJOHN, R. F., SMITH, R. *Sampling Gasborne Solids: Some Factors Affecting Characteristics of Miniature Cyclones*. Proc. Inst. Mech Engrs, v 192, September, p. 243-250, 1978.
- LÖFFER, F., *Abscheidung von Feinstaub aus Gasen*, Chem-Ing-Tech, v. 60(6), p. 443-452, 1988.
- LUDERA, L. M. *Design methods for cyclone preheaters of rotary kilns*. Zement-Kalk-Gips, v. 1, p. 10-12, 1989.
- MA, L.; INGHAM, D.B., WEN, X., *Numerical Modelling of the Fluid and Particle Penetration through Small Sampling Cyclones*. Journal of Aerosol Science, v.31, n.9, p. 1097-1119, 2000.
- MALISKA, C.R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1995
- MEIER, H. F. *Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional*. Tese (Doutorado), FEQ/UNICAMP, Campinas, 210p, 1998.
- MEIER, H. F., MORI, M.; *Gas-Solid flow in Cyclones: The Eulerian-Eulerian approach*. Computers Chemical Engineering, v. 22, p. S641-S644, 1998.

- MEIER, H.F., MORI, M., *Anisotropic behavior of the Reynolds Stress in Gas and Gas-Solid Flows in Cyclones*. Powder Technology v. 101, p. 108-119; 1999.
- MEIER, H. F., ROPELATO, K., MORI, M., IESS, J.J., FOSTER, H., Computational Fluid Dynamics (CFD) und Auslegung Von Zyklonen. Teil II. ZKG International, v.55, n.4, p.64-75, 2002.
- MOREIRA, D.R.R., Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2002.
- MOTHESS, H., SILVERT, J., LOFLER, F. in Processes Technology Conference, 1981
- NEBRA, S. A. *Secagem pneumática de bagaço de cana*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Campinas, Universidade Estadual de Campinas. 129p. Tese (doutorado), 1985.
- NEBRA, S. A., SILVA, M. A., MUJUMDAR, A. S. *Drying in cyclones - a review*. *Drying Technology*, v. 18, (3), p.791-832, 2000.
- NORILER, D., VEGINI, A.A., SOARES, C., BARROS, A.A.C., MEIER, H.F., MORI, M., *A new role for reduction in pressure drop in cyclones using computational fluid dynamics techniques*. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 21, n° 01, pp. 93-101, January-March 2004.
- NOWAKOWSKI, A.F., KRAIPECH, W., WILLIAMS, R.A., DYAKOWSKI, T.; *The Hydrodynamics of a Hydrocyclone based on a Three-Dimensional Multi-Continuum Model*. *Chemical Engineering Journal*, v. 80, p. 275-282, 2000.
- OGAWA, A., HIKICHI, T., *Theory of Cut-Size of a Rotary Flow Dust Collector*, *Bulletin JSME*, v. 24, n. 188, p. 340-347, 1981.

- OGAWA, A. *Estimation of the Collection Efficiencies of the Three Types of the Cyclones Dust Collectors from the Standpoint of the Flow Patterns in the Cylindrical Cyclone Dust Collectors*. Bulletin of JSME, v. 27, n.223, p. 64-69, 1984.
- OGAWA, A. *Mechanical Separation Process and Flow Patterns of Cyclone Dust Collectors*. Ind. Applied Mech. Ver , v. 50, n.3,p. 97-130, 1997.
- PATANKAR, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Ed. Hemisphere Pub. Co., New York, 1980.
- PATANKAR, S.V., SPALDING, D.B., *A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in 3D Parabolic Flows*, Int. j. Heat and Mass Transfer, v. 15, p. 1787-1806, 1972.
- PATANKAR, S.V., *A Calculation Procedure for 2D Elliptic Situations* , Numerical Heat Transfer, v. 4, p. 409-425, 1981.
- PATTERSON, P.A., MUNZ, R.J., *Cyclone Collection Efficiencies at very High Temperatures*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 67, April, p. 321-328, 1989.
- PATTERSON, P.A., MUNZ, R.J., *Gas and Particle Flow Patterns at Room and Elevated Temperatures*. The Canadian Journal of Chemical Engineering, v. 74, April, p. 213-221, 1996.
- PERES, A.P., KASPER, F.R.S., MEIER, H.F., HUZIWARA, W.K., MORI, M., *Análise de Modelos de Turbulência e da importância do refinamento da malha na simulação 3D do escoamento gasoso em um ciclone*. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica ,v.8, p 79-87, 2001.
- PERES, A. P., MEIER, H.F.; HUZIWARA, W.K.; MORI, M., *Experimental Study and Advances in 3D Simulation of Gas Flow in Cyclone using CFD*. European Symposium on Computer Aided Process Engineering, n. 12, p. 943-948, 2002.

- PERES, A. P., *Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) Aplicadas ao Escoamentos em Ciclones*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP, 2002.
- PERICLEOUS, K. A., *Mathematical Simulation of Hydrocyclones*. Applied Mathematical Modelling, v. 11, p. 242-255, August, 1987.
- PRANDTL, L., *Über die Ausgebildete Turbulent*. ZAMM v. 5, p. 136-139, 1925.
- PRANDTL, L., *Über ein neus Formel-System für die Ausgebildete Turbulenz* . Nachr. Akad. Wiss. Göttingen, Math Phys. Kl. , p. 06-19, 1945.
- REYNOLDS, O., *On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criteriom*. Philos. Trans. R. Soc. London Ser. A., 186, p. 64-123, 1895.
- RODI, W. *Examples of Turbulence Models for Incompressible Flows*. AIAA Journal, v. 20, p. 872-879, 1976.
- ROTTA, J.C. *Statistical Theory of Inhomogeneous Turbulence*. Z. Physical, v. 129, p. 547-559, 1951.
- SAFFMAN, P.G., *Model Equations for Turbulent Shear Flow*. Study Applied Mathematical, v. 53, p. 17-34, 1974.
- SHEPHERD, C.B., LAPPLE, C.E. *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors*. Ind. Engineering Chemical, v. 31, n. 8, p. 972-983, 1939.
- SHEPHERD, C.B., LAPPLE, C.E. *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors: Cyclone Without Inlet Vane* . Ind. Engineering Chemical , v. 32, n. 9, p. 1246-1252, 1940.

- SILVA, M. A. *Estudo da secagem em ciclone*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 146p. Tese (Doutorado), 1991.
- SILVA, M. A., GODOY, A. L., NEBRA, S. A. *Estudo experimental da variação do perfil de velocidade no ciclone com a concentração de sólidos*. In: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, RJ., Brasil, *Anais do X COBEM*, v. 1, p. 351-354, 1989.
- SLATERRY, J.C., *Momentum, Energy and Mass Transfer in Continua*. Ed. McGraw- Hill Book Co., New York, 1972.
- SOUZA, D.C.R., MORI, M., VIEIRA, V.N. *Software Aplicativo para a Simulação de Ciclones através de Métodos Empíricos ou Semi-empíricos*. Revista Brasileira de Engenharia Química, p. 27-34, Novembro, 1995.
- SPALARTE, P.R., JPU, W.H., STRELETS, M., ALLMARAS, S.R., *Comments on the feasibility of LES for wings and on hybrid RANS/LES approach*. 1st AFOSR International Conference on DNS/LES, Rustonm L.A. Greyden Press, Columbus, OH, 1997.
- SPEZIALE, C.G., *Analytical Methods for the Development of Reynolds –Stress Closures in Turbulence*, Annu. Review of Fluid Mechanics, v. 23, p. 107-157, 1991.
- STAIRMAND, C.J. *The Design and Performance of Cyclone Separators*. Trans. Inst. Chem. Engrs, v. 29, p. 356-373, 1951.
- STRELETS, M., *Detached Eddy Simulation of Massively Separated Flows*. AIAA paper number 0879, 2001.
- SZEKELY, J., CARR, R., *Heat Transfer in a Cyclone*. Chemical Engineering Science, v.21, p. 1119-1132, 1966.

- TARDIN Jr., P.R., GOLDSTEIN Jr.,T. *Considerações sobre o Desempenho de um Ciclone operando em um Leito Fluidizado Circulante a Frio*. Anais do III Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, Belém-PA, Brasil, Junho, p. 179-183, 1994.
- TAWARI, T.D., ZENZ, F.A. *Evaluating Cyclone Efficiencies from Stream Compositions*. Chemical Engineering, April 30, p. 69-73, 1984.
- TER LINDEN. A.J. *Investigations into Cyclone Dust Collectors*. Proc. Of the Institution of Mechanical Engineers. v. 160, p. 233-351, 1949.
- TRIESCH, O., BOHNET, M., *Measurement and CFD prediction of velocity and concentrations profiles in a decelerated gas-solids flow*, Powder Technology, n.115, p. 101-113, 2001.
- VERSTEEG, H.K., MALALASEKERA, M. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics –The Finite Volume Method*. Prentice Hall Press, 257p, 1995.
- WITT, P.J., MITTONI, L.J., WU, J., SHEPHERD, I.C., *Validation of a CFD model for predicting gas flow in a cyclone*, Proceedings of CHEMECA99, Australia, 1999.
- YUU, S., JOTAKI, T.; TOMITA, Y., YOSHIDA, K. *The Reduction of Pressure Drop Due to Dust Loading in a Conventional Cyclone*. Chem. Engineering Science , v. 33, p. 1573-1580, 1978.
- ZENZ, F.A. *Manual on Disposal of Refinery Wastes: Volume on Atmospheric Emissions*. API Publication 931, 1975.
- ZHAO, B., SHEN, H., KANG, Y., *Development of a symmetrical spiral inlet to improve cyclone separator performance*, Powder Technology IN PRESS (2004).
- ZHOU, L.X., SOO, S.L., *Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator*. Powder Technology, v. 63, p. 45--53, 1990.

- ZHOU, L.X., *Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion*. Ed. Science Press, Beijing, 1993.

CONSULTAS:

- Manual de Operação do software ANSYS® CFX® - 5TM

ANEXOS

ARTIGOS:

**APRESENTADOS EM CONGRESSOS E PUBLICADOS EM
PERIÓDICOS**

INFLUENCE OF INLET SECTION ANGLE ON CYCLONES GAS FLOW FLUID DYNAMICS

Sérgio Bernardo

State University of Campinas - Department of Chemical Processes,
School of Chemical Engineering, C.P. 6066, CEP 13083-970, Campinas, SP, Brazil
bernardo@feq.unicamp.br

Alexandre de Paula Peres

State University of Campinas - Department of Chemical Processes,
School of Chemical Engineering, C.P. 6066, CEP 13083-970, Campinas, SP, Brazil
apperes@lmspq.feq.unicamp.br

Milton Mori

State University of Campinas - Department of Chemical Processes,
School of Chemical Engineering, C.P. 6066, CEP 13083-970, Campinas, SP, Brazil
mori@feq.unicamp.br

Wilson Kenzo Huziwara

PETROBRAS, CENPES, Rio de Janeiro-RJ, Brazil

Abstract. Cyclones are equipments widely used in the removal of dust on gaseous flows in industrial processes. On its usual design, the cyclone model has been used without relevant modifications for about a century. Most of the attention has been in finding new methods to improve performance and decrease pressure drop. Recently, some studies were made to improve the equipment performance by evaluating geometric effects in the project of cyclones, such as tangential inlet section and scroll inlet duct. In this work, the effect of the cyclone geometry inlet section was studied through the inclination of 45 degrees in relation to the cyclone body. The study was performed for the gaseous phase based on an experimental study available in the literature, where a conventional inlet section was used. Numerical experiments were performed with CFX 5.5.1 and a grid containing 39850 cells. The axial and tangential velocity components were evaluated for three values of inlet velocities (2.75; 7.75 and 15.2 m/s) using the Reynolds Stress Model (RSM) turbulence model. Numerical results were compared with experimental data available in the literature and it was found that this new design can increase the peaks of tangential velocity inside the cyclone without increasing the pressure drop.

Keywords: *CFD, Cyclones, gas flow, RSM, lean inlet.*

1. INTRODUCTION

Cyclone dust collectors have been used in many industrial facilities in order to collect solid particles in gas-solid flow and reduce air pollution originating from chimney smoke, and also for chemical plant drier equipment (Ogawa (1997)). Currently, with the application of cyclones to new engineering processes such as dryers, reactors and particularly the removal of high-cost catalysts from gases in the petroleum refinery, industries are demanding a greater understanding of turbulent gas flow which could lead to rigorous procedures capable of accurately predicting velocity and pressure fields (Meier et al. (1999)).

One of the reasons for the numerous applications of the cyclone dust collectors (hereafter called cyclones for short) is that there are no moving parts. Therefore, such equipments are of easy inspection, reparation and maintenance in comparison with other inertia particle separators or bag filters (Löffler (1988)).

There are many types of cyclones for the purpose of solid particles separation. However, the following types of the cyclone are the most typical: returned flow or reversed flow, axial flow and rotary flow cyclone with tangential injection of the second gas flow to the cyclone body. The standard kind of cyclone (composed of the tangential inlet pipe to main body for generating the rotational gas flow in the equipment) has the exit pipe, cone and dust bunker. Ogawa et al. (1981) proposed that the solid particles coming into the cyclone immediately bifurcate into two layers of dust due to the eddy current based on the secondary flow on the upper cover surface in the coaxial space between cyclone body and exit pipe. One of them goes around the co-axial space on the upper cover surface and rotates around of the exit pipe with the gas flow. The other rotates and descends along the surface of the cyclone body. Then, on the surface of the cone, the dust layer, which is pressed to the cone surface by the centrifugal force, descends with the help of the gravitational force and descending airflow in the boundary layer. Lastly, these dust layers are deposited into the dust bunker (Zhou and Soo (1991)). However, some of the deposited dust rolls up from this dust layer by the secondary flow in the boundary and flow through the exit pipe. When fine solid particles must be collected by the cyclone, the centrifugal effect depends directly on the tangential velocity of the solid particle. Therefore, the tangential velocity of gas flow which relates to the pressure drop must be increased. These processes represent the separation mechanism for solid particles in the cyclone.

The historical transition of cyclone, can be found in Crawford (1976), Storch et al. (1979) and Ogawa (1984), where many old and interesting types of cyclones were discussed. The most standard construction of the returned flow type is composed by a cylindrical body, with a fixed diameter, and a conical part. Models or families of cyclones are established when a group of dimensions is fixed in relation to the diameter. There are various cyclone models in literature, but the most famous are the Stairmand (1951) and the Lapple (1951) one. These cyclones were developed through experimental tests and the aim was performance optimization. However, according to Dirgo et al. (1985), there is no theoretical base to assure that a specific model has all high performance characteristics. The advantage to use this cyclones model is that its performance properties are understood by many works found in the literature.

Since its inception over a century ago, many researchers have contributed to the large volume of work on improving the efficiency of cyclone by introducing new design and operation variables (Jo et al. (2000)). However, in most cases, the improvement in

efficiency is marginal and in some cases it is associated with complex structure and additional operating costs (Gregg (1995)).

Often cyclone design is based on empirical procedures. Novel designs including offset vortex finders, vortex breakers and various inlet geometries have been used in process plant to improve cyclone operation. Barth (1956) showed that the established positions of the inlet pipe were divided into the three types as show in Figure 1. Ogawa (1997) described this figure as follow: Type (a) is the standard form which is easy to construct, type (b) is the expensive construction of the inlet pipe which envelopes around the exit pipe and, at the same time, gradually descends and connects with de cyclone body and type (c) is well known as Ter Linden type, which envelopes the inlet pipe to the envelope angle β around the cyclone body.

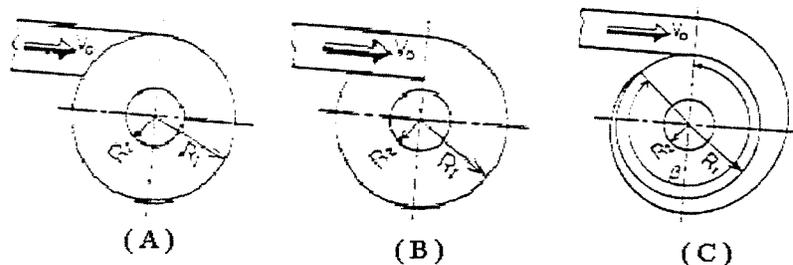


Figure 1. Three types of inlet pipe introducing gas flow tangentially into a cyclone. (Barth (1956) in Ogawa (1997)).

The merit of type (c) is that it has the effect of the generation of forced descending dust laden gas flow. Ter linden (1949) experimentally investigated the collection efficiency dependent on the envelope angle, β . He found that the optimum envelope angle was $\beta = 180^\circ$, and further angle increment angle did not promote any improvement in collection efficiency, and made the construction cost unnecessarily expensive. This type promotes the inlet angular momentum flux and its intent is to distribute the equal rotational flow in the cyclone body (Ogawa (1997)). Therefore, the pressure drop increases, but the vortex core vibration becomes weaker in comparison with types (a) and (b) shown Figure 1.

A good understanding of the fluid dynamics in a cyclone is required in order to make further designs improvements. Analytical techniques do not permit variations in the geometry to be readily assessed. Computational Fluid Dynamics (CFD) models provide an economical means of understanding the complex fluid dynamics and how it is influenced by changes in both design and operating conditions. CFD calculations are used for a wide range of different flows with the aim to diminish experimental investigation (Triesch et al. (2001)).

The first application of CFD techniques for cyclone simulation was presented by Boysan et al. (1982) In this work, the authors presented the time-averaged Navier-Stokes equations for the gas phase, coupled with an anisotropic turbulence model along with a combination of the $k-\epsilon$ model and the algebraic stress equations (Meier et al. (1999)). After this pioneering work, several studies have been done on the modeling of turbulence, in order to improve the prediction of velocity a pressure fields with modifications in the turbulence models. All these studies have assumed axial symmetry, allowing the use of a two-dimensional model, where the solid phase did not significantly interfere in the gas field (Meier et al. (1999)). The complex highly swirling flow in a cyclone provides a significant

challenge for CFD models and detailed validation of the results is required to establish confidence in their predictions.

If the inlet duct is ignored, the cyclone geometry is almost axi-symmetric and a number of previous CFD models have used this feature in order to simplify the model to a two-dimensional case (Duggins et al.(1987)). While this greatly reduces computational time, a two-dimensional model are limited, since the inlet duct location will break flow pattern symmetry. Furthermore such geometric simplifications cannot be used to assesses changes in the inlet design nor offset vortex finders (Witt et al.(1999)). The recent increase in computing power and grid generation capabilities have allowed the recent CFD models to include the full three-dimensional geometry and to be used for evaluation of design modifications. The lack of high quality measurements of the flow field in cyclones has limited the validation of past models (Witt et al. (1999)).

In this work, we present a study of the effects of the cyclone geometry on the inlet section with inclination 45 degrees inclination relative to the cyclone body. The starting point is based on an experimental study available in the literature, Patterson et al. (1996), where a conventional inlet section was used. Also a comparative study with the numerical simulation work of Peres (2002) is performed. Numerical experiments, in gaseous phase, was carried out using CFX 5.5.1, a CFD code available on market. This work represents a first stage in the development and validation of a CFD cyclone model. Future extensions to the model would allow for inclusion of the solid phase.

2- MATHEMATICAL MODELLING

For the calculation of the turbulent gas flow, the Reynolds averaged equations of mass and momentum have been used.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{u} - \nabla \cdot (\overline{\rho \mathbf{u} \mathbf{u}}) \quad (2)$$

where \mathbf{u} is the velocity vector, μ is the viscosity and $\overline{\rho \mathbf{u} \mathbf{u}}$ is the Reynolds stress tensor. These equations are applicable to incompressible and transient cyclones flow in 3D coordinates systems.

The flow can be considered isothermal, thus the energy conservation equation can be neglected.

2.1- Turbulence Modelling

Numerical methods have been developed to solve the above equations, where their complexity is significantly increase due to the Reynolds stress terms on the right hand side of Eq. (2). For strongly swirling flows the standard k- ϵ model is know to have limitations (Meier et al.(1999)). In order to obtain values for the Reynolds stress terms a turbulence model, known Reynolds Stress Model (RSM), is used.

The RSM model is based on transport equations for all components of the Reynolds stress tensor and the dissipation rate. They are suitable for strongly anisotropic flows. This

model does not use the eddy viscosity hypothesis. An equation for the transport of Reynolds stresses in the fluid is solved for the individual stress components.

The differential equations, given bellow, for each component of the Reynolds stresses have been developed and their solution give each stress component, allowing anisotropy in the turbulent stress terms.

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (U_k \overline{\rho u_i u_j}) = P_{ij} + \phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{2}{3} c_s \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_k} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \rho \quad (3)$$

Here, ϕ_{ij} is the pressure-strain correlation, k is turbulent kinetic energy, ε is dissipation rate of turbulent kinetic energy, and P , the exact production term, is given by:

$$P = -\rho (\overline{u \cdot u} (\nabla U)^T + (\nabla U) \overline{u \cdot u}) \quad (4)$$

As the turbulence dissipation appears in the individual stress equations, an equation for ε is still required:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\sigma_{\varepsilon RS}} \left(\mu + \rho C_{\mu RS} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] \quad (5)$$

In these equations, the anisotropic diffusion coefficients of the original models are replaced by an isotropic formulation, which increases the robustness of the RSM. The model constants are:

$$c_s = 0,22; \quad c_{\varepsilon 1} = 1,45; \quad c_{\varepsilon 2} = 1,9; \quad C_{\mu RS} = 0,1152.$$

2.2- Numerical Methods

Equations (1-5) were solved numerically by a finite volume method using the commercial CFD code CFX 5.5.1, in which the control volume method is used to discretize the transport equation. The pressure-velocity coupling algorithm SIMPLEC (SIMPLE Consistent) and higher upwind interpolation scheme was used in all numerical experiments. More details about these schemes can be found in Patankar (1980).

Numerical experiments were carried out with accuracy of 10^{-5} for the euclidean norm of the source mass in the pressure-velocity coupling. Transient run was performed using the steady state results for initial conditions, with 3 iterations per time step. Time steps of 0,005 seconds and total simulation time of 10 seconds were used. A tight convergence criterion could be achieved using these conditions.

2.3- Computational Grid and Boundary Conditions

Cyclone geometry used in this work was based on Patterson et al. (1996), in which a modification on geometry inlet section through the inclination of 45 degrees in relation to the cyclone body was used. The Table 1 shows the geometric characteristics of this cyclone, and the surface mesh for both cyclones are presented in Figures 2.

Table 1: Cyclone geometric configuration.

Geometric Properties	Dimension (m)
Cyclone diameter (D_C)	0.102
Diameter of the top exit pipe (“overflow”) (D_s)	0.0508
Diameter of the bottom exit pipe (“underflow”) (D_L)	0.0254
Height of the cylindrical region; (L_c)	0.1522
Height of the inlet rectangular section; (L_e)	0.0508
Height of the top exit pipe (“overflow”); (L_s)	0.108
Height of the conical region (L_{co})	0.203

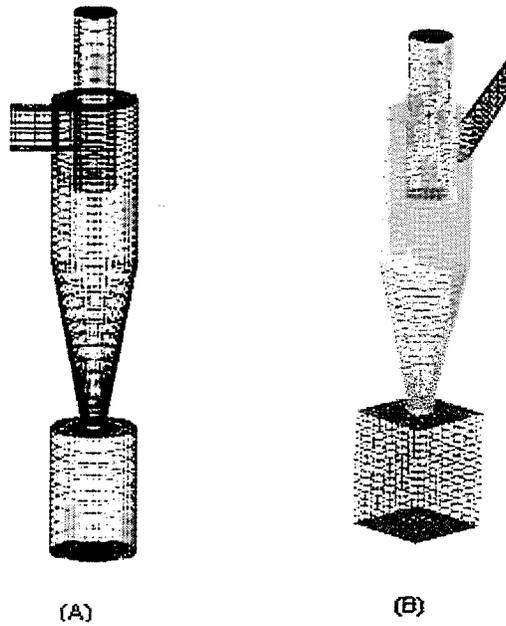


Figure 2: Cyclone geometry and grid for: (A) for Patterson et al. (1996). Figure extracted from Peres et al. (2002) and (B) inclination by 45 degrees (actual case).

The cyclones numerical grids were constructed (Figures) using two mesh building codes: BUID (Figure 2A) and ICEM CFD HEXA (Figure 2B). It was previously evaluated the influence of the grid refinement, generated from both pre-processors in the simulation process. The final grids had around of 48.000 cells (Figure 2A) and 39.805 cells (Figure 2B).

Gas flow was assumed to be at Standard Temperature and Pressure (STP) conditions and three inlet velocities were considered in this study: 2.75 m/s, 7.75m/s and 15.2m/s. The boundary conditions were considered uniform profiles at the inlet for all variables, no slip conditions at the walls and atmospheric pressure conditions were assumed at the outlet.

To validate the CFD model proposed in this paper, we have used two cases studied found in the literature. The first one is the experimental study by Patterson et al. (1996) and the second is a numerical simulation by Peres (2002), where the case studied by Patterson et al.(1996), was simulated in the same conditions used in this work, but using the CFX 4.4 code.

3. RESULTS

Initially, numerical solutions were obtained for the gas phase in the steady state with 500 iterations, applying a higher order interpolation scheme for the velocity components to guarantee stability of the solution (one of the criteria adopted was a value of less than 10^{-5} for the euclidean norm of the source mass in the pressure-velocity coupling). The first solutions in steady state were used as initial conditions for a transient procedure. This has been found useful to overcome the difficulties in convergence presented by the Reynolds Stress Model (RSM) with higher order interpolation scheme.

Numerical results of the effect of the cyclone geometry inlet section with inclination of 45 degrees in relation to the equipment were obtained for the inlet gas velocities (2.75, 7.75 and 15.2 m/s) and were compared to experimental data obtained by Patterson and Munz (1996) and numerical solutions obtained by Peres (2002). Figures 3, 4 ,5, 6 and 7 show the actual numerical solutions obtained for the distributions of tangential and axial velocities of the gas obtained in a height of 0.13 m from the top of the cyclone.

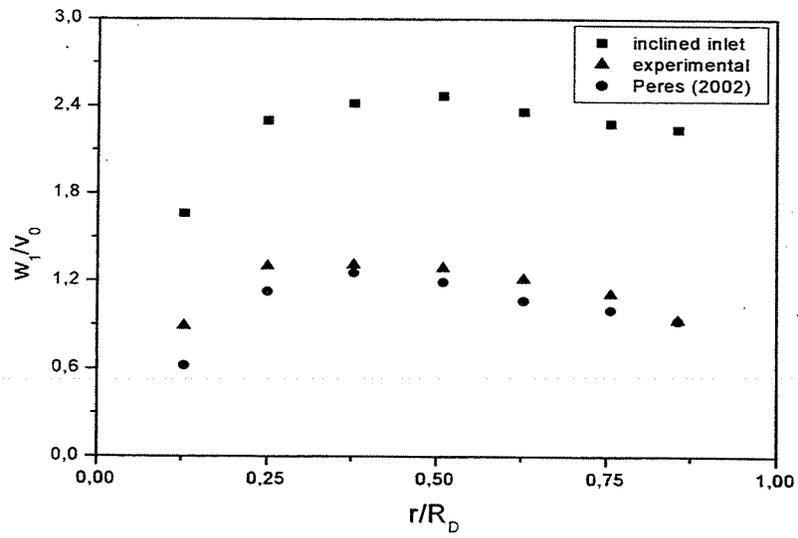


Figure 3 – Distributions of tangential velocity in the cyclone ($v_0 = 2.75$ m/s).

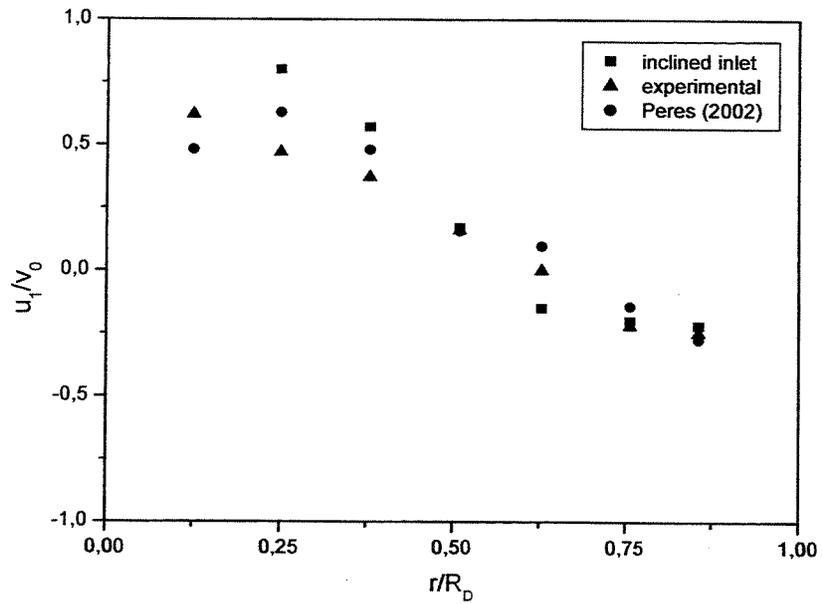


Figure 4 – Distributions of axial velocity in the cyclone ($v_0 = 2.75$ m/s).

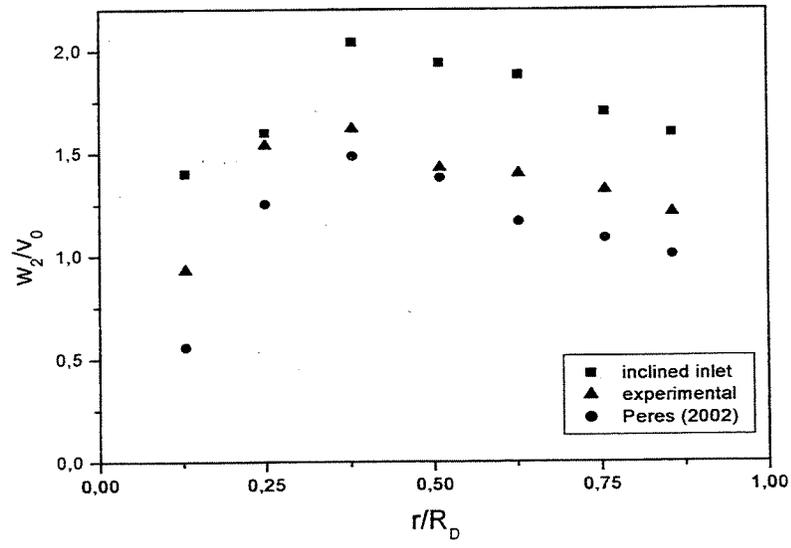


Figure 5 – Distributions of tangential velocity in the cyclone ($v_0 = 7.75$ m/s).

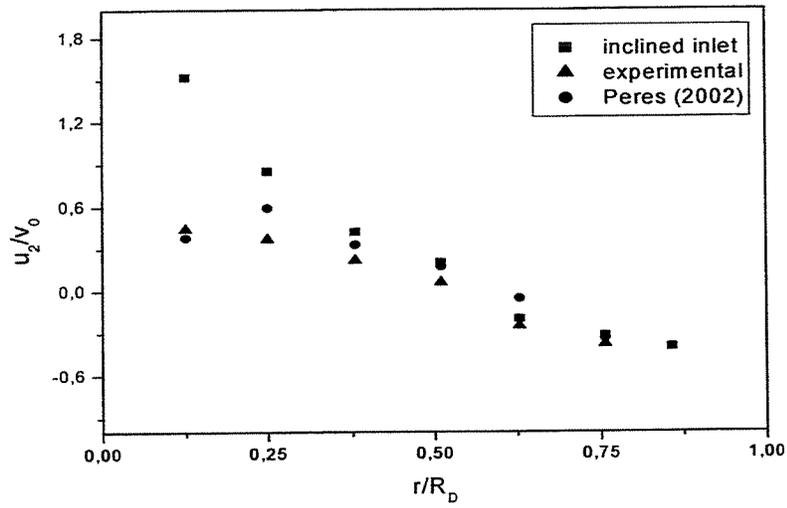


Figure 6 – Distributions of axial velocity in the cyclone ($v_0 = 7.75$ m/s).

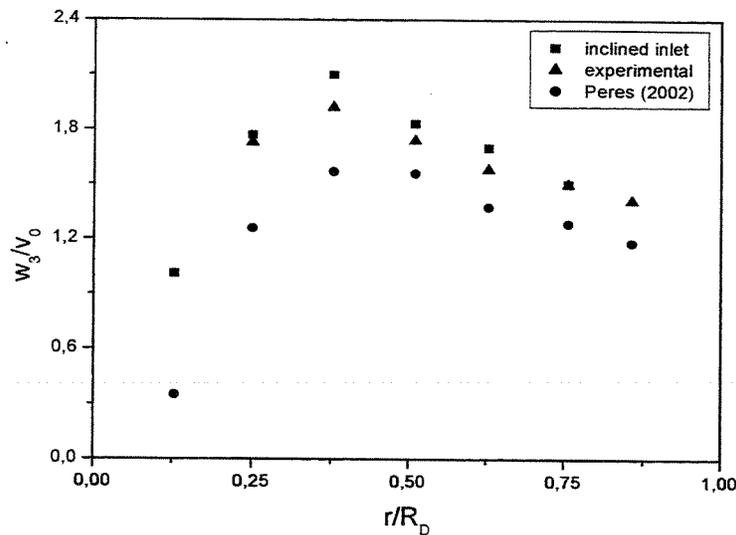


Figure 7 – Distributions of tangential velocity in the cyclone ($v_0 = 15.2$ m/s).

Data obtained on the capability of the turbulence model to represent the radial distributions of axial and tangential velocities throughout the cyclone were compared with the experimental data, and where a good agreement was verified. Numerical results presented a good representation of the swirling flow in the cyclone with the tangential velocity peak like a Rankine curve typical of flows in this apparatus. The inclination of 45 degrees of the inlet section in relation to the equipment caused higher values of tangential velocity, mainly to inlet air velocities of 2.75 and 7.75 m/s.

Radial distributions of tangential velocity to air inlet velocity of 2.75 m/s are presented in Figure 4. It can be observed a higher swirling velocity, which is about twice the values obtained experimentally velocities to without the inclination of 45 degrees. A better representation of the results to air inlet velocity of 2.75 m/s can be seen in the maps of pressure and velocities as shown in Fig. 8, 9, 10 and 11.

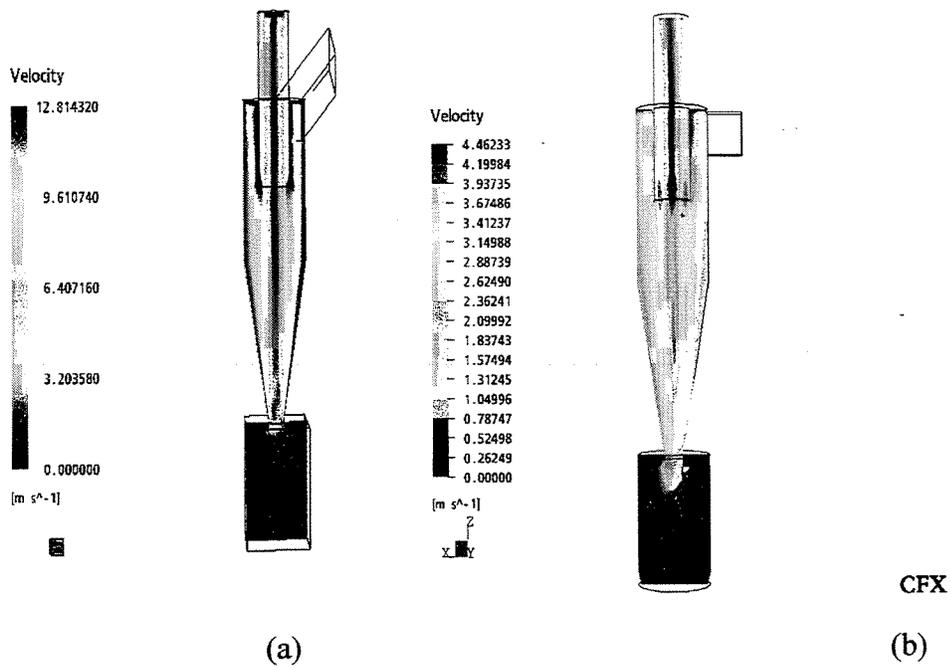


Figure 8 – Velocity maps for the numerical solutions: (a) actual, (b) Peres (2002).

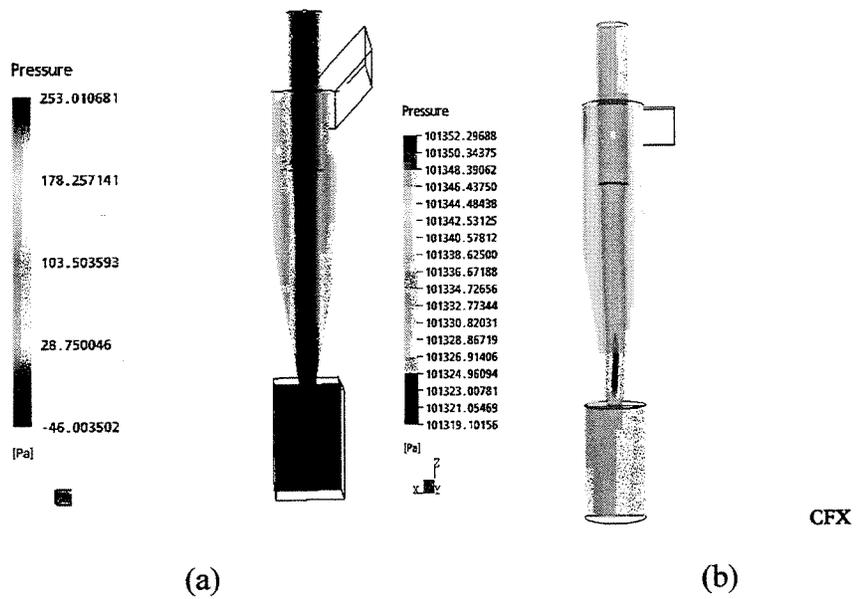


Figure 9 – Maps of pressure for the numerical solutions: (a) actual, (b) Peres (2002).

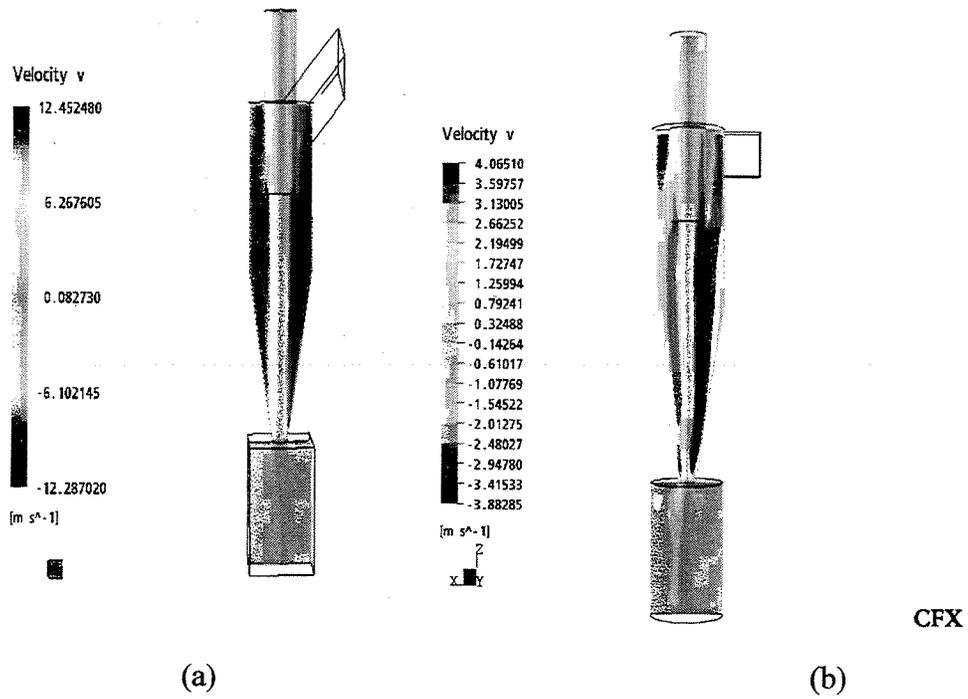


Figure 10 – Maps of tangential velocity for the numerical solutions: (a) actual, (b) Peres (2002).

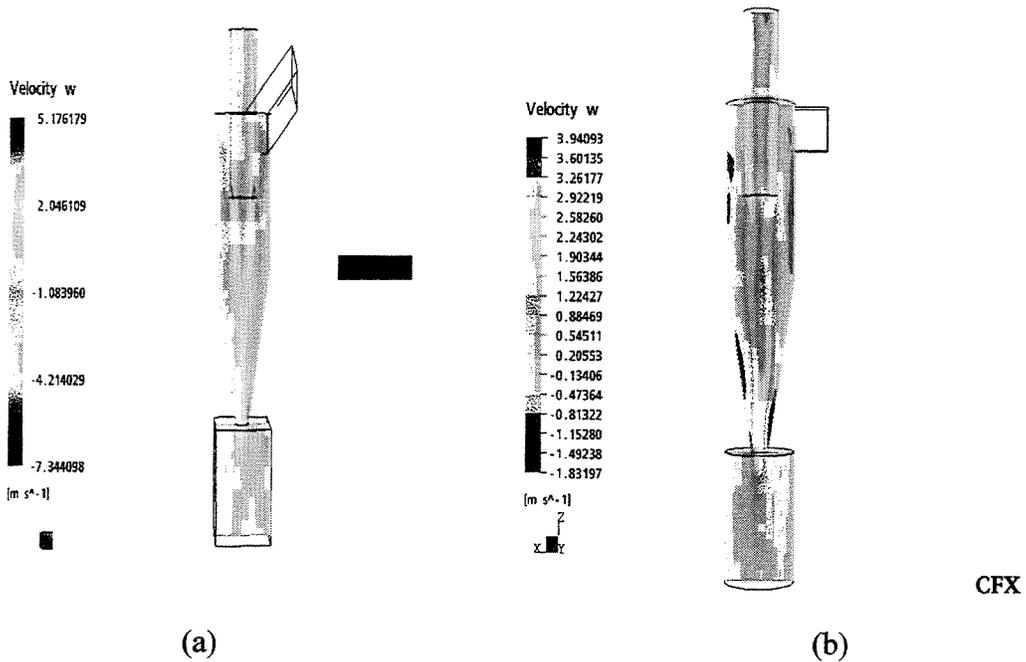


Figure 11 – Maps of axial velocity for the numerical solutions: (a) Actual (b) Peres (2002).

The differences between Fig. 8 (a) and (b) are clear. The regions of high velocity are larger for the cyclone with inlet inclination of 45 degrees (Fig. 8 (a)) and the flow reversion cannot be observed when compared with the other cyclone (Fig. 8 (b)).

In Figure 9, maps of pressure showing a large region of low pressure near the cyclone axis along the equipment can be observed. Also, it can be seen that both cyclones presented practically the same pressure drop profile.

Maps of tangential velocity are shown in Fig. 10 (a) and (b). It can be seen in both cases the high vorticity preservation phenomenon. However, for the inclined inlet (Fig. 10 (a)), the high tangential velocities can be seen near the cyclone walls and through a large region, while for conventional design (Fig. 10 (b)), the region of high velocity is not close to the walls and is not as large as the case of Fig.(10a) . Similar results to the maps of axial velocity to the two cyclones are verified in Fig. 11.

4. CONCLUSIONS

The proposal of a new design to the inlet section of the cyclone with the inclination of 45 degrees was analyzed in this work and it was verified that it can be an alternative to increase the peaks of tangential velocity inside the cyclone without increasing of the pressure drop.

Calculation of the effects of the inlet with 45 degrees inclination in relation to the equipment in multiphase flows are currently being performed by our group and future work describing such effects in collection efficiency will be presented.

Acknowledgements

The authors are grateful to FAPESP (process number 00/03966-3) and PETROBRAS for the financial support in this project.

REFERENCES

- Barth, W., 1956, Berechnung und auslegung von zyklonab scheidern, Brenstoff-Warme-Kraft, vol.8, n.1, pp. 1-9.
- Boysan, F., Ayers, W.H., Swithenbank, J.A.,1982, A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design, Inst. of Chemical Engineers, vol. 60, pp. 222-230.
- Crawford, M., 1976, Air pollution control theory, McGraw-Hill.
- Dirgo, J. and Leith, D., 1985, Performance of theoretically optimized cyclones, Filtration and Separation, March/April, pp. 119-125.

- Duggins, R.K. and Frith, P.C.W., 1987, Turbulence anisotropy in cyclone, *Filtration and Separation*, vol. 24, pp. 394-397.
- Gregg, W.W., 1995, High efficiency cyclones for powder processing applications, *Adv. Filtration and Separation Technology*, vol. 9, pp. 240
- Jo, Y., Tien, C., Ray, M.B., 2000, Development of a post cyclone to improve the efficiency of reverse flow cyclones, *Powder Technology*, n.113, pp. 97-108.
- Lapple, C.E., 1951, Process use many collectors types, *Chemical Engineering*, vol. may, pp. 144-151.
- Löffler, F., 1988, Abscheidung von Feinstaub aus Gasen, *Chem-Ing-Tech*, vol. 60(6), pp. 443-452.
- Meier, M. and Mori, M., 1999, Anisotropic behavior of the Reynolds stress in gas and gas-solid flows in cyclones, *Powder Technology*, vol. 101, pp. 108-119.
- Ogawa, A. and Hikichi, T., 1981, Theory of cut-size of a rotary flow dust collector, *Bulletin JSME*, vol. 24, n. 188, pp. 340-347.
- Ogawa, A., 1984, Separation of particles from air and gases, I and II, CRC Press, Florida.
- Ogawa, A., 1997, Mechanical separation process and flow patterns of cyclone dust collectors, *Appl. Mech. Rev.*, vol. 50, n.3, pp. 91-130.
- Patankar, S.V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Ed. Hemisphere Pub. Co., New York.
- Patterson, P.A. and Munz, R.J., 1996, Gas and Particle flow patterns at room and elevated temperatures, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 74, April, pp. 213-221.
- Peres, A. P., 2002, Estudo experimental e técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) aplicadas a escoamentos em ciclones, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP.
- Stairmand, C.J., 1951, The design and performance of cyclone separators, *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, vol.29, pp. 356-373.
- Storch, O. et al, 1979, *Industrial separators for gas cleaning*, Elsevier.
- Ter Linden, A. J., 1949, Investigation into cyclone dust collectors, *Proc. Institute of Mechanical Engineering*, pp. 233-254.
- Triesch, O and Bohnet, M., 2001, Measurement and CFD prediction of velocity and concentrations profiles in a decelerated gas-solids flow, *Powder Technology*, n.115, pp. 101-113.
- Witt, P.J., Mittoni, L.J., Wu, J., and Shepherd, I.C., 1999, Validation of a CFD model for predicting gas flow in a cyclone, *Proceedings of CHEMECA99*, Australia.
- Zhou, L. and Soo, S.L., 1991, Boundary conditions of particle phase and collection efficiency in cyclones, *Powder Technology*, 64, pp. 213-220.

COMPUTATIONAL STUDY OF CYCLONE FLOW FLUID DYNAMICS USING A DIFFERENT INLET SECTION ANGLE

S. Bernardo^a,

A. P. Peres^b,

M. Mori^c

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Departamento de Processos Químicos
Laboratório de Modelagem e Simulação de
Processos Químicos
Cidade Universitária Zeferino Vaz
Distrito de Barão Geraldo
Caixa Postal 6066, CEP 13083-970
Campinas, São Paulo, Brasil
^a bernardo@feq.unicamp.br
^b apperes@lmspq.feq.unicamp.br
^c mori@feq.unicamp.br

ABSTRACT

The conventional design of the cyclone model has been used without significant modifications for about a century. Recently, some studies were carried out to improve equipment performance by evaluating the geometric influence of the tangential inlet section and scroll inlet duct design. In this work, the influence of cyclone inlet section geometry was studied using an angle of 45 degrees in relation to the cyclone body. The study was conducted for the gas and gas-particle phases, based on an experimental study available in the literature, where a conventional inlet section was used. Numerical experiments were carried out with the CFX computational code. The fluid dynamics profiles and tangential velocity component were evaluated for three inlet velocities (2.75, 7.75 and 15.2 m/s) using the Reynolds Stress model. The results showed that this proposal is useful for improving the cyclone performance.

Keywords: CFD, Cyclones, gas flow, RSM, lean inlet

INTRODUCTION

The conventional form of cyclone design has survived largely unchanged for over a century. The historical development of the cyclone can be found in Crawford (1976), Storch (1979) and Ogawa (1984), where many old and interesting types of cyclones are discussed. There are various cyclone models in the literature, but the most famous are the Stairmand (1951) and the Lapple (1951) models. These cyclones were developed through experimental tests with the aim of optimizing performance. However, according to Dirgo and Leith (1985), there is no theoretical basis to assure that a specific model has only high performance characteristics.

An important application of the cyclones is the recovery of catalyst in fluid catalytic cracking units (FCCU). The gas cyclone in FCCU is generally used in a multi-cell arrangement to meet recovery requirements of typically more than 99%. At a further stage, a high-efficiency cyclone system may be used to remove the remaining particles. The gas cyclone used at this stage operates at low solids loading, with the particles having a diameter in the range of 0.1-80 μm . High collection efficiencies (more than 99.9%) are demanded, e.g., to meet environmental regulations on dust emission and/or to prevent excessive wear of turbine blades in energy/recovery systems (Hoekstra, *et al.*, 1999).

If the inlet duct is ignored, cyclone geometry is almost axisymmetric and a number of previous Computational Fluid Dynamics (CFD) models have used this feature in order to simplify the model as a two-dimensional case (Duggins and Frith, 1987). While this greatly reduces computational time, a two-dimensional model is limited, since of location of the inlet duct will break flow pattern symmetry. Furthermore, these geometric simplifications cannot be used to assess changes in inlet design or offset vortex finders. The recent increase in computing power and grid generation capabilities has allowed the recent CFD models to include the full three-dimensional geometry and to be used for evaluation of design modifications.

In this work, we present a study of the influence of cyclone geometry on an inlet section with a 45 degree angle in relation to the cyclone body. The starting point is based on an experimental study available in the literature (Patterson and Munz, 1989 and 1996), where a conventional inlet section was used. Also a comparative study with the numerical simulation work of Peres (2002) is conducted. Numerical experiments for a three-dimensional model were carried out for gas and gas-solid flow using CFX, a CFD code available on the market.

MATHEMATICAL MODELLING

Turbulence

Turbulence consists of fluctuations in the flow field in time and space. It is a complex process, mainly because it is three dimensional, unsteady and consists of many scales. It can have a significant effect on the characteristics of the flow. Turbulence occurs when the inertia forces in the fluid become significant compared to viscous forces, and is characterized by a high Reynolds Number. In principle, the Navier-Stokes equations describe both laminar and turbulent flows without the need for additional information. However, turbulent flows at realistic Reynolds numbers span a large range of turbulent length and time scales and would generally involve length scales much smaller than the smallest finite volume mesh which can be practically used in a numerical analysis.

To enable the effects of turbulence to be predicted, a large amount of CFD research has concentrated on methods which make use of turbulence models. Turbulence models have been specifically developed to account for the effects of turbulence without recourse to a prohibitively fine mesh and Direct Numerical Simulation.

The Reynolds Stress Turbulence Model

The Reynolds stress turbulence models are based on transport equations for all components of the Reynolds stress tensor and the dissipation rate. These models do not use the eddy viscosity hypothesis, but solve an equation for the transport of Reynolds stresses in the fluid. The Reynolds stress model transport equations are solved for the individual stress components.

The Reynolds averaged momentum equations for the mean velocity U are

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu \nabla U) = \\ = -\nabla p'' - \nabla \cdot (\rho \overline{u \otimes u}) + B \end{aligned} \quad (1)$$

where p'' is a modified pressure, μ is the viscosity, B is the sum of body forces and the fluctuating Reynolds stress contribution is $\overline{u \otimes u}$. Unlike eddy viscosity models, the modified pressure has no turbulence contribution and is related to the static (thermodynamic) pressure by:

$$p'' = p + \nabla \cdot U \left(\frac{2}{3} \mu - \zeta \right) \quad (2)$$

where ζ is the bulk viscosity.

In the differential stress model, $\overline{u \otimes u}$ is made to satisfy a transport equation. A separate transport

equation must be solved for each of the six Reynolds stress components of $\overline{\rho u \otimes u}$. The differential equation Reynolds stress transport is:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho u \otimes u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho u \otimes u \otimes U}) - \\ - \nabla \cdot \left(\rho C \frac{k}{\varepsilon} \overline{u \otimes u} (\nabla u \otimes u)^T \right) = \\ = P + G + \phi - \frac{2}{3} \delta \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

where P and G are shear and buoyancy turbulence production terms of the Reynolds stresses respectively, ϕ is the pressure-strain tensor, ε is dissipation rate of turbulent kinetic energy and C is a constant.

The differential equations, given bellow, for each component of the Reynolds stresses have been developed and their solution gave each stress component, allowing anisotropy in the turbulent stress terms.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (U_k \overline{\rho u_i u_j}) = P_{ij} + \\ + \phi_{ij} O + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{2}{3} c_s \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_k} \right] - \\ - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \rho \end{aligned} \quad (4)$$

Here, ϕ_{ij} is the pressure-strain correlation, k is turbulent kinetic energy, ε is dissipation rate of turbulent kinetic energy, and P , the exact production term, is given by:

$$P = -\rho (\overline{u \cdot u} (\nabla U)^T + (\nabla U) \overline{u \cdot u}) \quad (5)$$

As the turbulence dissipation appears in the individual stress equations, an equation for ε is still required:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + \\ \nabla \cdot \left[\frac{1}{\sigma_{\varepsilon RS}} \left(\mu + \rho C_{\mu RS} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] \end{aligned} \quad (6)$$

In these equations, the anisotropic diffusion coefficients of the original models are replaced by an isotropic formulation, which increases the robustness of the RSM. The model constants are:

$$c_s = 0,22; \quad c_{\varepsilon 1} = 1,45; \quad c_{\varepsilon 2} = 1,9; \quad C_{\mu RS} = 0,1152.$$

NUMERICAL METHODS

Equations were solved numerically by the finite volume method using the commercial CFD code CFX, in which the control volume method is used to discretize the transport equation. The pressure-velocity coupling algorithm SIMPLEC (SIMPLE Consistent Method) and the higher upwind interpolation scheme were used in all numerical experiments. More details on these schemes can be found in Patankar (1980).

COMPUTATIONAL GRID AND BOUNDARY CONDITIONS

The cyclone geometry used was based on Patterson and Munz (1996), in which the geometry of the inlet section was modified 45 degree using a angle in relation to the cyclone body. All geometric configurations are presented in Patterson and Munz (1996). The geometric characteristics of this cyclone and the surface mesh for both cyclones are presented in figure 1

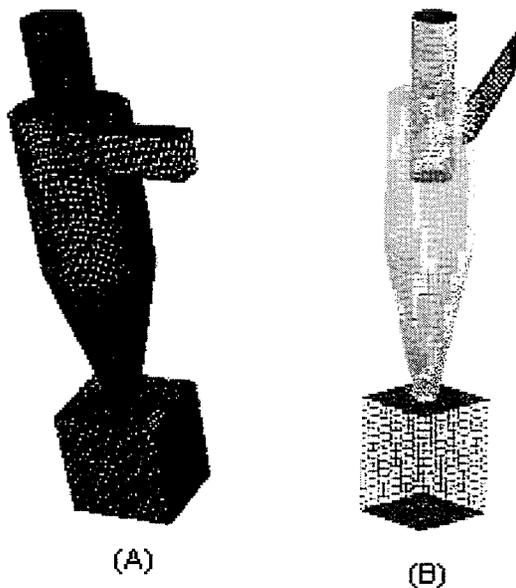


Figure 1- Cyclone geometry and grid for: (A) Patterson and Munz (1989, 1996) and (B) 45 degree angle (current case).

The numerical grids were constructed using the mesh building code ICEM CFD HEXA and have around of 48.000 cells. All boundary conditions were based on Patterson and Munz (1989 and 1996) which were used for comparison with the CFD model proposed in this work. Gas flow was assumed to be at Standard Temperature and Pressure (STP) conditions and the inlet velocities were 2.75, 7.75 and 15.2 m/s. Solid particles were considered to have 10 μ m

medium diameter and $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$. Solid phase has an inlet volume fraction of 6.13×10^{-5} . The boundary conditions were considered uniform profiles at the inlet for all variables. The conditions at the walls were no slip to gas phase, and free slip to solid phase. Atmospheric pressure conditions were assumed at the outlet.

Peres (2002), where the case studied by Patterson and Munz (1996) was simulated under the same conditions as those used in this work, was used to validate the turbulence model used in the current work.

RESULTS

Gas Flow Study

Figures 2, 3 and 4 show the numerical solutions obtained for the distributions of tangential velocities of the gas obtained at height of 0.12 m from the top of the cyclone in the current work.

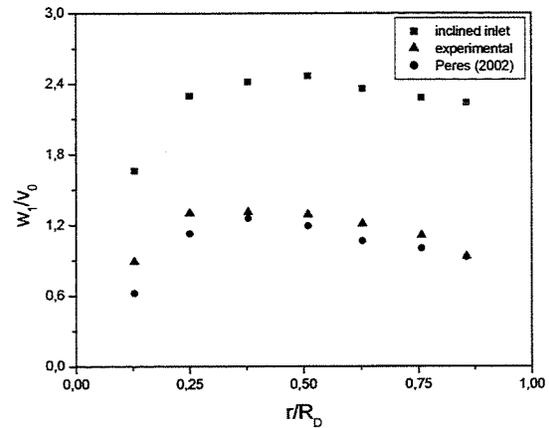


Figure 2. Distributions of tangential velocity in the cyclone ($v_0 = 2.75 \text{ m/s}$).

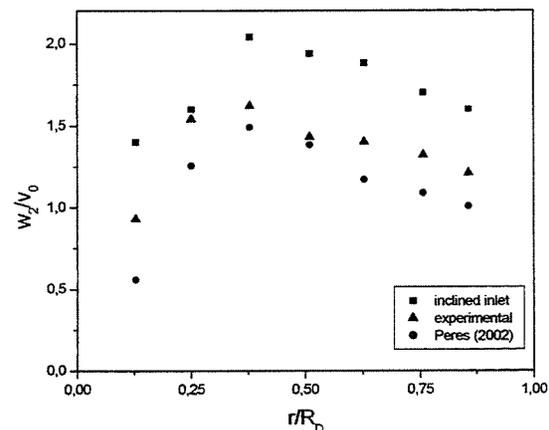


Figure 3. Distributions of tangential velocity in the cyclone ($v_0 = 7.75 \text{ m/s}$).

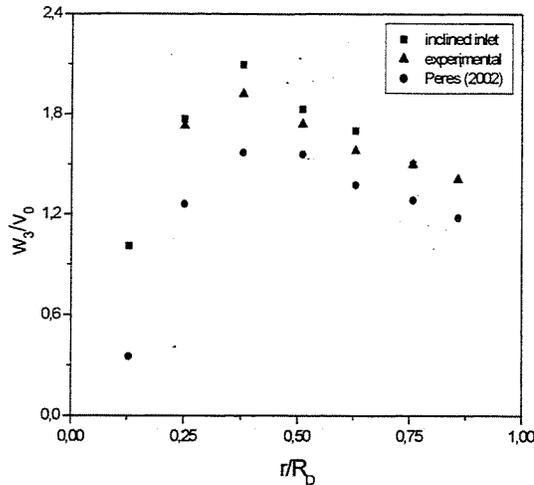


Figure 4. Distributions of tangential velocity in the cyclone ($v_0 = 15.2$ m/s).

Numerical results provided a good representation of the swirling flow in the cyclone. Data obtained on the capability of the turbulence model to represent the radial distributions of tangential velocities throughout the cyclone were compared with the experimental data and good agreement was verified. The 45 degree angle of the inlet section produced higher values of tangential velocity, mainly for inlet air velocities of 2.75 and 7.75 m/s. The influence was stronger for the low inlet velocities. In Figure 4, where the inlet gas velocity is 15.2 m/s, the large changes in the tangential velocity profile are not verified. In Figure 2 a higher swirling velocity, which is about twice the values obtained experimentally to without 45 degree angle can be observed.

A better representation of tangential velocity for the air inlet velocity of 2.75 m/s can be seen in Fig. 5 (a, b). In both cases the high vorticity preservation phenomenon can be seen. However, for the angled inlet (Fig. 5a), the high tangential velocities can be seen near the cyclone walls and through a large region, while for the conventional design (Fig. 5b), the region of high velocity is not close to the walls and is not as large as it is in the case in Fig.5a. These characteristics can be important when we analyze gas-solid flow because the solid phase tends to move toward the wall and improve collection efficiency. Both others gas inlet velocities used in this work (2.75 and 7.75m/s) showed the same profile as that shown in Figure 5.

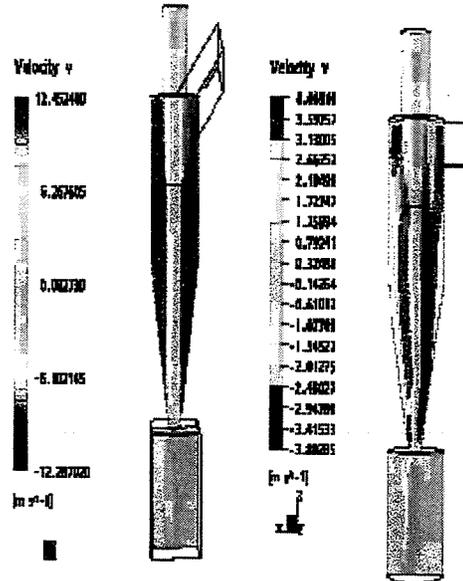


Figure 5. Tangential velocity profiles for the numerical solutions: (a) actual work, (b) Peres (2002).

Gas-Solid Flow

Numerical results for the influence of the cyclone inlet section geometry with a 45 degree angle in relation to the equipment were obtained for the inlet gas-solid velocities (2.75, 7.75 and 15.2 m/s). Figure 6 shows the current numerical results for the distributions of tangential velocity of the gas obtained at a height of 0.12m from the top of the cylindrical cyclone body.

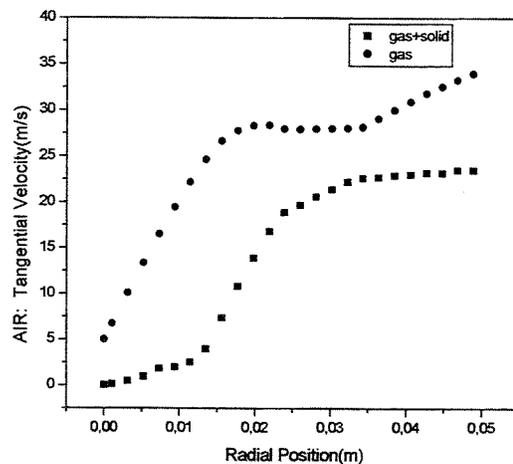


Figure 6. Distribution of gas tangential velocity in gas-solid flow in the cyclone ($v_0 = 15.2$ m/s).

The Figure 6 shows the influence of solids on gas flow on tangential velocities profiles, where we can see the decrease of gas tangential velocity peaks for a gas flow with solids. The tangential velocities decreased when the inlet section angle is increased to 45 degrees. This characteristic was observed by Bernardo et al. (2003) and represents a very important characteristic about fluid dynamics of cyclones because there is a relation between tangential velocity peak and the pressure drop (cyclone performance parameter). For angled inlet cyclones these reductions were about 50%, but this value is higher than the ones obtained using the cyclone without inclined inlet. These results are in agreement with Yuu et al. (1978) and Patterson and Munz (1996). Gas inlet velocity of 2.75 and 7.75 m/s showed the same behavior.

A better representation of the results for an air inlet velocity of 15.2 m/s can be seen in the maps of velocities (tangential, radial and axial), as shown in Figure 7. The high tangential velocities can be seen near the cyclone walls (Fig. 7a), in agreement with Figure 5. We can see large eddies on reverse flow region and velocities gradients across vertical axes. These profiles are in agreement with numerical results obtained by Peres (2002).

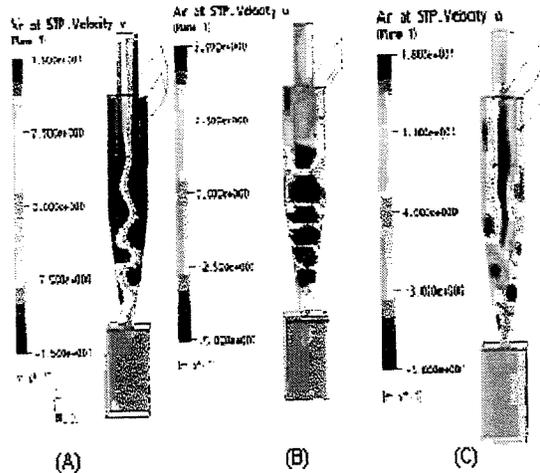


Figure 7. Maps of air velocity in gas-solid flow: (A) tangential, (B) radial and (C) axial.

The method for calculation of the collection efficiency of this cyclone type was based on Meier and Mori (1999). Table 1 shows the results about this one.

Table 1. Collection Efficiency and Pressure Drop Data.

Property	Patterson and Munz (1989)	Actual:
Collection Efficiency	92%	90.50%
Pressure Drop (PD)	579 Pa	620 Pa
PD Reduction	30%	42%

We can see that the performances parameters for this type of cyclone could be obtained with the models. Patterson and Munz (1989) have used the conventional inlet and their results shown in Table 2 are only illustrative. The model applied in this study had been tested previously in that work and by Peres (2002). Results showed good agreement with the experimental data of Patterson and Munz (1989), using the cyclone with a normal inlet. For this reason, we conclude that the model was validated and results for the proposed are a good representation for this study.

CONCLUSIONS

The proposal of a new design for to the inlet section of the cyclone using a inclination of 45 degrees was analyzed in this work and it was verified that it can be provide an alternative for increasing the peaks of tangential velocity inside the cyclone without increasing of the pressure drop. The influence of the inlet with a 45 degree angle in relation to the equipment in multiphase flows is currently being performed by our group, and future work describing these effects on collection efficiency will be presented. Regarding the velocity distributions in the gas-solid flow, this modification gave under predicted values for the gas velocity profile when there where solids in the flow. All results indicate that this proposed 45 degree inlet can provide an alternative for studying the fluid dynamics inside this equipment and increasing performance parameters.

The next step in this work is to apply the angled inlet section in different types of cyclones, specially of the industrial type.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to FAPESP (process number 00/03966-3) for its financial support.

REFERENCES

- Bernardo, S., Peres, A.P., Mori, M. and Huziwara, W.K., 2003, "Influence of Inlet section Angle on Cyclones Gas Flow Fluid Dynamics", Proceedings on XXIV CILAMCE – Congresso Ibero Latino-Americano em Métodos Computacionais em Engenharia, Ouro Preto- Brazil.
- Crawford, M., 1976, "Air pollution control theory", McGraw-Hill.
- Dirgo, J. and Leith, D., 1985, "Performance of theoretically optimized cyclones", Filtration and Separation, March/April, pp. 119-125.
- Duggins, R.K. and Frith, P.C.W., 1987, "Turbulence anisotropy in cyclone", Filtration and Separation, volume 24, pp. 394-397.
- Hoekstra, A.J., Derksen, J.J. and Van Den Akker, H.E.A., 1999, "An Experimental and Numerical Study of Turbulent Swirling Flow in Gas Cyclones". Chemical Engineering Science, volume 54, pg. 2055-2065.
- Lapple, C.E., 1951, "Process use many collectors types", Chemical Engineering, volume may, pp. 144-151.
- Meier, M. And Mori, M., 1999, "Anisotropic behavior of the Reynolds stress in gas and gas-solid flows in cyclones", Powder Tech., volume 101, pp. 108-119.
- Ogawa, A., 1984, "Separation of particles from air and gases", I and II, CRC Press, Florida.
- Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Ed. Hemisphere Pub. Co., New York.
- Patterson, P.A. and Munz, R.J., 1989, "Cyclone Collection Efficiencies at very High Temperatures". The Can. Jo. of Chem. Eng., volume 67, April, pg. 321-328.
- Patterson, P.A. and Munz, R.J., 1996, "Gas and Particle flow patterns at room and elevated temperatures", The Canadian Journal of Chem. Eng., volume 74, April, pp. 213-221.
- Peres, A. P., 2002, "Estudo experimental e Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) aplicadas a Escoamentos em Ciclones", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas-SP.
- Stairmand, C.J., 1951, "The design and performance of cyclone separators", Transaction Institute of Chemical Engineering., volume 29, pp. 356-373.
- Storch, O., 1979, "Industrial separators for gas cleaning", Elsevier.
- Yuu, S., Jotaki, T.; Tomita, Y. and Yoshida, K., 1978, "The Reduction of Pressure Drop Due to Dust Loading in a Conventional Cyclone", Chemical Engineering Science, volume 33, pg. 1573-1580.