

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO**

**DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS**

**TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL  
(CFD) APLICADAS A ESCOAMENTOS EM CICLONES**

**Autor: Alexandre de Paula Peres**

**Orientador: Prof. Dr. Milton Mori**

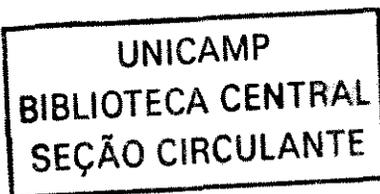
**Co-Orientador: Prof. Dr. Henry França Meier**

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

Campinas – São Paulo

Novembro de 2002

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL



UNIDADE	30
Nº CHAMADA	TUNICAMP P415t
V	EX
TOMBO BCI	52376
PROC.	124103
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	
Nº CPD	

CM00179787-3

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

BIB ID 279785

P415t

Peres, Alexandre de Paula

Técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD)  
aplicadas a escoamentos em ciclones / Alexandre de  
Paula Peres. --Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Milton Mori e Henry França Meier.  
Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,  
Faculdade de Engenharia Química.

1. Métodos de simulação. 2. Ciclones. 3. Escoamento bifásico.  
4. Escoamento turbulento. 5. Dinâmica dos fluidos. I. Mori,  
Milton. II. Méier, Henry França. III. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

200306093

**Dedico este trabalho a DEUS,  
pela bênção concedida,  
a meus pais,  
Oswaldo e Maria Luísa,  
e a Cíntia Pilenso,  
por tudo.  
Obrigado!**

Tese de Doutorado defendida pelo Eng. Alexandre de Paula Peres e aprovada em 29 de Novembro de 2002 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



---

Prof. Dr. Milton Mori - Orientador



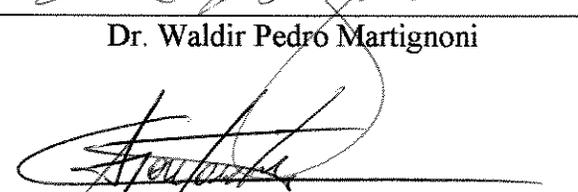
---

Prof. Dr. Henry França Meier - Co-Orientador



---

Dr. Waldir Pedro Martignoni



---

Prof. Dr. Carlos Alberto Uyrajara Gontarski



---

Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco



---

Prof. Dr. Reginaldo Guirardello



## **A ESTRADA**

**Você não sabe o quanto eu caminhei**

**Pra chegar até aqui**

**Percorri milhas e milhas antes de dormir, eu não cochilei**

**Os mais belos montes escalei, nas noites escuras de frio chorei.**

**A vida ensina e às vezes traz o tom**

**Pra nascer uma canção**

**Com a fé do dia-a-dia**

**Encontro a solução, encontro a solução ...**

**...Meu caminho só meu pai pode mudar, meu caminho só meu pai**

**Meu caminho só meu Deus pode mudar**

**[ CIDADE NEGRA ]**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Milton Mori, pela orientação serena e sincera no transcorrer deste trabalho e, sobretudo, pela confiança depositada.

Ao Prof. Henry Meier, pela grande colaboração ao longo de toda a Tese e pelas inúmeras sugestões e correções.

Aos Eng. Waldir Martignoni e Wilson Kenzo Huziwara, da PETROBRAS, pela ponte Universidade-empresa, sempre almejada por todos, nem sempre tão fácil de ser alcançada, mas que se tornou bastante viável ao longo deste projeto, por serem pessoas bastante acessíveis e de grande conhecimento técnico.

Ao Prof. Marco Cremasco, pelas inúmeras dicas e amizade.

A Fábio Kasper, de nosso LMSPQ, pelas aulas de “BUILD” e pelas malhas construídas.

Aos inseparáveis amigos da EQ90-Fundão Unicamp, os quais fazem nossas vidas mais alegres, Ademir Schiezaró (Fofão), Jefferson Corrêa (Gerso), Branco, Guyot, Mente, Zuza, Toca, Léguas, Eliseu, Mauro e Papa.

Aos mais que colegas de LMSPQ, os amigos: Anna Ritta, Cleber, Daniel, Fujita, Graça, Karla, Leonardo, Rodrigo, Sérgio e Wesley.

Aos amigos da FEQ/UNICAMP e de toda a vida: Marlus Rolemberg, Angela Hayashi, Jair, Márcio, Basilino, João, João Vicente, Eduardo (Urso), William e Everaldo.

A Takeo Fudihara, por me apresentar o CFX pela primeira vez e dar as primeiras dicas de seu funcionamento.

Ao Eng. Alexandre Trentin, da SIX/PETROBRAS, pela ajuda na obtenção dos dados experimentais.

A meus irmãos, Luciana e Júnior, ao Faber e a meu sobrinho Vítor Henrique, pelo apoio.

A Fabrícia Castelar, pela compreensão e carinho, incondicionais.

A Alessandra Pezzato, pelo apoio e amizade tanto nos momentos mais difíceis quanto nos alegres, característicos do final de Tese.

A todos aqueles que dividiram comigo estes frutíferos anos de UNICAMP e que, certamente, deixarão muitas saudades.

Meus sinceros agradecimentos!!!

## SUMÁRIO

Dedicatória	iii
Epígrafe	v
Agradecimentos	vii
Sumário	ix
Resumo	xiii
Abstract	xv
Nomenclatura	xvii
Lista de Figuras	xxi
<b>Capítulo 1. Introdução</b>	<b>1</b>
1.1. Pontos de Investigação	2
1.2. Apresentação do Trabalho	3
<b>Capítulo 2. Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1. O Ciclone e suas Aplicações	5
2.2. O Ciclone Separador de Partículas Sólidas	6
2.3. Projeto e Avaliação do Desempenho dos Ciclones	9
2.4. Aplicação das Técnicas de CFD em Ciclones	10
2.4.1. Simulação Bidimensional de Ciclones	11
2.4.2. Códigos Desenvolvidos para a Simulação Tridimensional de Ciclones	14
2.4.3. Códigos Comerciais para a Simulação Tridimensional de Ciclones	15
<b>Capítulo 3. Métodos Numéricos</b>	<b>19</b>
3.1. Modelagem Matemática	19
3.1.1. Equações de Fechamento	21
3.1.2. Modelos de Turbulência	23
3.2. Condições de Contorno	27

<b>Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões</b>	153
7.1. Conclusões Principais	153
7.2. Sugestões para Futuros Trabalhos	154
<b>Referências Bibliográficas</b>	157

## RESUMO

Este trabalho se propôs a estudar o escoamento do gás em ciclones em duas frentes: por intermédio do mapeamento do campo de velocidades em um ciclone instalado em uma planta semi-piloto de uma unidade da PETROBRAS-SIX e por meio do desenvolvimento de um modelo fluidodinâmico computacional (CFD) tridimensional, amparado pelos resultados experimentais obtidos nesse trabalho e de resultados disponíveis na literatura. Os ciclones têm sido empregados na indústria de processos como separadores de partículas desde o início do século passado, sendo que inúmeros trabalhos de investigação científica visando a obtenção de técnicas que predissessem a queda de pressão e a curva de eficiência de separação são encontrados na literatura. Contudo, somente modernas técnicas, como as da fluidodinâmica computacional (CFD), têm se mostrado capazes de prever a contento os complexos fenômenos que ocorrem no interior ciclônico. Desta forma, utilizou-se o código de CFD comercial CFX – versões 4.3 e 4.4, da AEA Technology, o qual utiliza o método dos volumes finitos com variáveis co-localizadas resolvendo o sistema em coordenadas generalizadas para a obtenção das soluções das equações de transporte. As malhas numéricas foram construídas por intermédio da técnica dos multi-blocos, utilizando o pré processador “BUILD” presente no código. Os principais resultados mostraram que a metodologia empregada se mostrou adequada e apta a reproduzir o comportamento fluidodinâmico do escoamento do gás (monofásico) e do gás com a presença de particulados (bifásico, em uma abordagem Euleriana-Euleriana), em ciclones tanto em escala de laboratório quanto em escala industrial.

## ABSTRACT

The aim of this work was to analyze the gas flow in cyclones experimentally and numerically. The experimental study was conducted in an acrylic cyclone settled in a pilot unity belonging to SIX/PETROBRAS in São Mateus do Sul, PR. Numerical solutions were obtained by the development of a 3-D computational fluid dynamics (CFD) model, sustained by the experimental results obtained in this work and results from the literature. Cyclones have been used as solid particle separators in large-scale chemical processes since the beginning of the past century. Several studies of scientific investigation in order to obtain prediction techniques of pressure drop and collection efficiency are found in the literature. However, the design of new cyclones and the analysis of the actual equipment can be best achieved using computational fluid dynamics (CFD) techniques in order to obtain higher collection efficiency and a lower pressure drop. The 3-D simulations of the turbulent gas flow in the cyclone was carried out using the computational fluid-dynamics code CFX, versions 4.3 and 4.4, by AEA Technology. The numerical solutions were obtained with a finite-volume method and body fitted grid generation, using the pre-processor BUILD to generate the grids with multi-block techniques. The methodology showed great capability to represent the swirling flow in small cyclones as in industrial cyclones.

## NOMENCLATURA

### Letras Latinas

$A$  – área superficial [ $m^2$ ];

$C_D$  – coeficiente de arraste, [ $kg \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ ];

$d$  – diâmetro, [m];

$D$  - diâmetro da coluna cilíndrica do ciclone, [m];

$D_C$  - diâmetro da coluna cilíndrica do ciclone, [m];

$D_L$  – diâmetro da base do ciclone, [m];

$D_S$  - diâmetro do tubo de saída de gás, [m];

$\bar{g}$  - aceleração da gravidade, [ $m \cdot s^{-2}$ ];

$G$  – geração de turbulência;

$G(\epsilon)$  – módulo de elasticidade, [ $N \cdot m^{-2}$ ];

$I$  – tensor identidade, ( $kg \cdot m \cdot s^{-2}$ );

$k$  – energia cinética turbulenta, ( $m^2 \cdot s^{-2}$ );

$L_C$  – diâmetro da seção cilíndrica do ciclone, [m];

$L_{CO}$  - diâmetro da seção cônica do ciclone, [m];

$L_e$  - altura da entrada do ciclone, [m];

$L_S$  – altura de imersão do tubo de saída de gás, [m];

$\dot{m}_p$  - vazão mássica de sólidos, [ $kg \cdot s^{-1}$ ];

$P$  – pressão do sistema, [Pa];

$q_p$  – razão de alimentação, [ $kg \cdot m^{-3}$ ];

$Q_g$  – vazão volumétrica de gás, [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ];

$r$  – posição radial, [m];  
 $R_D$  – raio do ciclone, [m];  
 $Re$  - número de Reynolds, (adimensional);  
 $S_\phi$  - termo fonte,  
 $T_g$  – tensor viscoso,  
 $t$  – tempo, (s);  
 $\bar{u}$  – vetor velocidade, [m.s<sup>-1</sup>];  
 $v$  – velocidade, [m.s<sup>-1</sup>];  
 $V$  – volume de controle, [m<sup>3</sup>];  
 $z$  – altura do topo do ciclone, [m];

#### Letras Gregas

$\beta$  - coeficiente de arraste gás-partícula, (adimensional);  
 $\delta$  - tensor da tensão de cisalhamento, [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-2</sup>];  
 $\xi$  - fração volumétrica, (adimensional);  
 $\varepsilon$  - taxa de dissipação de energia cinética turbulenta, [m<sup>2</sup>.s<sup>-2</sup>];  
 $\kappa$  - viscosidade bulk, [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>];  
 $\mu$  - viscosidade dinâmica, [kg.m<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup>];  
 $\rho$  - massa específica, [kg.m<sup>-3</sup>];  
 $\phi$  - esfericidade, (adimensional);  
 $\phi$  - correlação pressão-tensão,  
 $\sigma$  - constantes do modelo k- $\varepsilon$ ;  
 $\tau$  - tensor viscosidade, [kg.m<sup>-1</sup>s<sup>-2</sup>];  
 $\Gamma_\phi$  - coeficiente difusivo

## Subscritos

0 – entrada;  
p – particulada;  
g – gasosa.

## Abreviações

CFD – “Computational Fluid Dynamics” ou fluidodinâmica computacional;

CPU – unidade de processamento computacional;

DSM – “Differential Stress Model” ou Modelo dos tensores de Reynolds;

Efic – eficiência;

FCC – craqueamento catalítico em leito fluidizado;

FEQ – Faculdade de Engenharia Química;

LDA - “Laser Doppler Anemometer”;

LDV – “Laser Doppler Velocimetry”;

LES – “Large Eddy Simulation”;

LMSPQ – Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos;

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.;

SIX – Superintendência de Industrialização do Xisto;

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – O ciclone e suas características	8
Figura 4.1 – Malha 3-D do ciclone – Caso 1	40
Figura 4.2 - Distribuições da velocidade tangencial para a Malha 1, utilizando-se o modelo k- $\epsilon$ e $v_0 = 9,8$ m/s	41
Figura 4.3 - Distribuições do componente de velocidade tangencial para a Malha 1, utilizando-se o DSM e $v_0 = 9,8$ m/s	42
Figura 4.4 - Comparação entre as malhas numéricas utilizando o modelo DSM e esquema “higher upwind”	43
Figura 4.5 - Comparação entre as malhas numéricas utilizando o modelo DSM e esquema “QUICK”	43
Figura 4.6 - Comparação entre os esquemas de interpolação “higher upwind” e “QUICK”, $v_0 = 9,8$ m/s e modelo DSM	44
Figura 4.7 - Comparação entre os esquemas “higher upwind” e “QUICK”, $v_0 = 13,4$ m/s e modelo DSM	45
Figura 4.8 - Comparação entre os esquemas “higher upwind” e “QUICK”, $v_0 = 18,0$ m/s e modelo DSM	45
Figura 4.9. Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 1	47
Figura 4.10. Mapeamentos dos campos de velocidade axial – Caso 1	49
Figura 4.11. Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 1	51
Figura 4.12 – Malha 3-D do ciclone – Caso 2	56
Figura 4.13 - Geometria 1: Distribuições do componente de velocidade tangencial	57
Figura 4.14 - Geometria 1: Distribuições da velocidade axial para $v_0 = 2,75$ m/s	57
Figura 4.15 - Geometria 1: Distribuições da velocidade axial para $v_0 = 7,75$ m/s	58
Figura 4.16 - Geometria 1: Distribuições da velocidade axial para $v_0 = 15,2$ m/s	58
Figura 4.17 - Geometria 2: Distribuições do componente de velocidade tangencial	59
Figura 4.18 - Geometria 2: Distribuições da velocidade axial para $v_0 = 7,75$ m/s	59

Figura 4.19 - Geometria 3: Distribuição do componente de velocidade tangencial para $v_0 = 7,75\text{m/s}$	60
Figura 4.20 - Geometria 3: Distribuição do componente de velocidade axial para $v_0 = 7,75\text{m/s}$	60
Figura 4.21 - Geometria 4: Distribuição do componente de velocidade tangencial para $v_0 = 7,75\text{m/s}$	61
Figura 4.22 - Geometria 4: Distribuição do componente de velocidade axial para $v_0 = 7,75\text{m/s}$	61
Figura 4.23 - Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 2	63
Figura 4.24 - Mapeamentos dos campos de velocidade axial – Caso 2	65
Figura 4.25 - Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 2	67
Figura 4.26 – Detalhe Fotográfico da unidade de ciclones a frio da Petrobras-SIX em São Mateus do Sul	73
Figura 4.27 – Detalhe Fotográfico do ciclone utilizado	75
Figura 4.28 – Detalhe Fotográfico da sonda acoplada ao ciclone	77
Figura 4.29 – Detalhe Fotográfico da sonda utilizada	79
Figura 4.30 – Esquematização do ciclone utilizado	81
Figura 4.31 – Malha 3-D do ciclone – Caso 3	84
Figura 4.32 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 1 – $v_0 = 11,0\text{m/s}$ )	85
Figura 4.33 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 1 – $v_0 = 12,5\text{m/s}$ )	85
Figura 4.34 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 2 – $v_0 = 11,0\text{m/s}$ )	86
Figura 4.35 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 2 – $v_0 = 12,5\text{m/s}$ )	86
Figura 4.36 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 3 – $v_0 = 11,0\text{m/s}$ )	87
Figura 4.37 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 3 – $v_0 = 12,5\text{m/s}$ )	87
Figura 4.38 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 4 – $v_0 = 11,0\text{m/s}$ )	88
Figura 4.39 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 4 – $v_0 = 12,5\text{m/s}$ )	88
Figura 4.40 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 5 – $v_0 = 11,0\text{m/s}$ )	89
Figura 4.41 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 5 – $v_0 = 12,5\text{m/s}$ )	89
Figura 4.42 – Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 3	91
Figura 4.43 – Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 3	93
Figura 4.44 – Detalhe da malha de um ciclone com entrada tangencial	95
Figura 4.45 – Detalhe da malha de um ciclone com entrada em voluta	95

Figura 4.46 – Malha 3-D do ciclone – Caso 4	96
Figura 4.47 – Distribuição da velocidade tangencial – Caso 4	97
Figura 4.48 – Mapeamento dos campos de (a) velocidade tangencial, (b) velocidade axial e (c) pressão – Caso 4	99
Figura 4.49 – Malha 3-D do ciclone – Caso 5	101
Figura 4.50 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 1)	103
Figura 4.51 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 2)	103
Figura 4.52 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 3)	104
Figura 4.53 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 4)	104
Figura 4.54 – Mapeamentos dos campos de (a) velocidade tangencial, (b) velocidade axial e (c) pressão	105
Figura 4.55 – Malha 3-D do ciclone – Caso 6	107
Figura 4.56 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 1)	109
Figura 4.57 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 2)	109
Figura 4.58 – Mapeamentos dos campos de (a) velocidade tangencial e (b) pressão	111
Figura 5.1 - Distribuições da velocidade tangencial da fase gasosa	118
Figura 5.2 - Mapeamentos da velocidade tangencial da fase gás no ciclone: (a) gás; (b) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (d) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$	121
Figura 5.3 - Mapeamentos da velocidade axial da fase gás no ciclone: (a) gás; (b) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (d) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$	123
Figura 5.4 - Mapeamentos do campo de pressão da fase gás no ciclone:(a) gás; (b) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (d) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$ .	125
Figura 5.5 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 3s (a) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$	129
Figura 5.6 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 6s. (a) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$	131
Figura 5.7 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 9s. (a) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$	133
Figura 5.8 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 12s. (a) $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b) $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c) $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$	135
Figura 5.9 – Distribuições da velocidade tangencial (ponto 1) – Caso 8	138

Figura 5.10 – Distribuições da velocidade tangencial (ponto 2) – Caso 8	138
Figura 5.11 - Distribuições da velocidade tangencial (ponto 3) – Caso 8	139
Figura 5.12 - Distribuições da velocidade tangencial (ponto 4) – Caso 8	139
Figura 5.13 – Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 8	141
Figura 5.14 – Mapeamentos dos campos de velocidade axial – Caso 8	141
Figura 5.15 – Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 8	143
Figura 5.16 – Desenvolvimento do campo de fração volumétrica da fase particulada ao longo do tempo (4 a 16 s)	147
Figura 5.17 – Desenvolvimento do campo de fração volumétrica da fase particulada ao longo do tempo (20 a 32 s)	149
Figura 5.18 – Desenvolvimento do campo de fração volumétrica da fase particulada ao longo do tempo (36 a 44 s)	151

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Os ciclones são equipamentos amplamente utilizados em diversos processos das indústrias químicas, principalmente quando é necessária a separação de sólidos de uma corrente gasosa. Na indústria do petróleo, por exemplo, os ciclones são bastante utilizados em reatores e regeneradores nas unidades de craqueamento catalítico (FCC) e como separadores de partículas nas correntes efluentes das unidades de incineração de rejeitos.

Em contraposição à importância de suas aplicações (recuperação de catalisadores nas unidades de craqueamento catalítico de petróleo, por exemplo), estão os métodos comumente disponíveis para o projeto e avaliação da performance dos ciclones, cujas metodologias são de natureza empírica ou semi-empírica, particulares às situações em que foram coletados os dados experimentais, apresentando baixa confiabilidade na reprodução de resultados obtidos em plantas industriais. Como resultado, inviabiliza-se a utilização destes procedimentos para estudos avançados de melhoria de performance, quantificada pela alta eficiência de coleta e reduzida queda de pressão no equipamento.

Diante da inadequação desses procedimentos, objetiva-se com esse trabalho dar continuidade aos estudos realizados na área de fluidodinâmica computacional (CFD) no tocante à simulação do escoamento do gás no interior ciclônico e, em uma etapa posterior, analisar também o efeito da presença de particulados no escoamento.

Para as simulações, utilizam-se estações de trabalho SUN ULTRA 10 com o código computacional CFX, versões 4.3 e 4.4, da AEA Technology, o qual consiste de um potente gerador de malhas e de um módulo de solução das equações de transporte, em que as soluções numéricas são obtidas pelo método dos volumes finitos.

### 1.1. Pontos de Investigação

Com o desenvolvimento desse trabalho, pretende-se corroborar um modelo matemático para uso posterior em estudos de otimização do processo de craqueamento catalítico de petróleo da PETROBRAS. Para tanto, faz-se o mapeamento experimental do campo de velocidade tangencial do gás em um ciclone instalado em uma unidade de ciclones a frio na planta semi-piloto da PETROBRAS-SIX em São Mateus do Sul – PR, e conseguinte simulação numérica deste caso, bem como de casos retirados da literatura. Desta forma, contribui-se tanto para a melhora da eficiência de recuperação de catalisador nesta unidade, quanto fornecem-se subsídios para o desenvolvimento de um modelo CFD tridimensional para a simulação do escoamento ciclônico.

Os pontos de investigação específicos são:

- Muitos trabalhos consultados fazem 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), demonstram que a hipótese de simetria axial não corresponde satisfatoriamente à realidade. Com o avanço dos recursos computacionais e dos códigos comerciais disponíveis, esse trabalho tem como premissa realizar o refino da malha numérica do modelo tridimensional, descartando a hipótese de simetria axial, para que se obtenha uma melhor representação do escoamento turbulento.
- Como a utilização de um modelo de turbulência isotrópico, por exemplo, modelo k- $\epsilon$ , ou um modelo anisotrópico, por exemplo o modelo dos tensores de Reynolds, mais conhecido como DSM (“Differential Stress Model”) para a representação da turbulência é ainda motivo de muita discussão, pretende-se no transcorrer dessa Tese realizar uma

análise dos padrões de escoamento obtidos mediante a confrontação de modelos isotrópicos e anisotrópicos.

- A maioria dos trabalhos que tratam do escoamento gás-particulados avaliam 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, levando em consideração a influência de um diâmetro médio da fase particulada em um modelo tridimensional.

Dessa forma, esse trabalho visa dar continuidade à linha de pesquisa em fluidodinâmica computacional, nos âmbitos da Engenharia Química e do grupo de pesquisa no Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos (LMSPQ) da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

## 1.2. Apresentação do Trabalho

A apresentação do trabalho desenvolvido durante esta Tese se divide em sete capítulos, a seguir sintetizados:

**Capítulo 1. Introdução** – Neste capítulo, apresenta-se uma breve descrição sobre o ciclone, equipamento objeto das simulações numéricas, e os pontos específicos a serem abordados no transcorrer do trabalho.

**Capítulo 2. Revisão Bibliográfica** – Apresenta-se uma revisão de alguns dos mais relevantes trabalhos publicados na literatura sobre ciclones, enfatizando-se os estudos direcionados à simulação do escoamento ciclônico utilizando-se as técnicas de fluidodinâmica computacional nos últimos cinco anos.

**Capítulo 3. Métodos Numéricos** - Neste capítulo abordam-se a modelagem matemática, na qual são apresentadas as equações que governam o fenômeno, as condições de contorno utilizadas nas simulações, o método dos volumes finitos e suas peculiaridades, além de uma breve descrição do código computacional CFX.

**Capítulo 4. Resultados Numéricos do escoamento do Gás em Ciclones** - Neste capítulo, são apresentados os resultados numéricos das simulações do escoamento do gás em ciclones, efetuadas no código computacional CFX, versões 4.3 e 4.4, dividindo-se a apresentação entre os seis estudos de caso abordados neste trabalho. Dentre estes estudos, têm-se os resultados referentes ao estudo experimental realizado em um ciclone com entrada tangencial, o qual faz parte de uma planta semi-piloto instalada na unidade da PETROBRAS-SIX (Superintendência de Industrialização do Xisto) localizada na cidade de São Mateus do Sul - PR.

**Capítulo 5. Resultados Numéricos do Escoamento Gás-Particulados em Ciclones** – Apresentam-se as simulações numéricas do escoamento gás - sólido em ciclones, em uma abordagem Euleriana-Euleriana, dividindo-se a apresentação entre dois estudos de caso avaliados neste trabalho.

**Capítulo 6. Conclusões e Sugestões** – Apresentam-se as principais conclusões e sugestões advindas do desenvolvimento deste trabalho.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. O Ciclone e suas Aplicações

O ciclone é um equipamento normalmente utilizado na separação de sólidos de uma corrente gasosa, sendo que apresenta na sua forma clássica uma construção cone-cilíndrica patenteada em 1886 por G. Jackson (OGAWA, 1989). Popularizou-se também o seu uso na limpeza de gases a altas temperaturas (PATTERSON e MUNZ, 1996).

Além da clássica utilização como separador de partículas, o regime dinâmico em seu interior tem aumentado a viabilidade da utilização do ciclone como um equipamento de troca térmica (BASKAKOV et al., 1988), sendo encontrados importantes trabalhos nessa direção. KLUCOVSKY et al. (1962) concluíram que o ciclone proporciona elevados valores para a transferência de calor entre as paredes do equipamento e o fluxo de gás.

Com o trabalho de SZEKELY e CARR (1966), abriu-se definitivamente a discussão da utilização do ciclone como trocador de calor, principalmente nos casos em que são necessárias altas taxas de transferência de calor entre as paredes do equipamento e os sólidos presentes na corrente gasosa.

Como decorrência dos estudos nessa área, encontram-se na literatura algumas correlações empíricas para a estimativa da troca térmica propiciada pelos ciclones, tanto para a troca de calor gás-parede bem como para a troca gás-partículas. Destacam-se as correlações de SZEKELY e CARR (1966), FROLOV (1987), CREMASCO et al. (1993), YEN et al. (1990), PERES e CREMASCO (1997), entre outras.

Em outras aplicações nas quais há troca térmica, existem trabalhos que estudam a viabilidade do ciclone como secador, como os de NEBRA (1985), SILVA (1991) e

BENTA (1997), embora no trabalho de PERES (1997), recomenda-se a sua utilização apenas como pré-aquecedor.

CORRÊA et al. (2002) só conseguiram sucesso na utilização do ciclone como secador de bagaço de cana quando efetuaram mudanças na geometria do equipamento, diminuindo substancialmente o comprimento da seção cônica do ciclone. Os autores verificam que a utilização de secadores ciclônicos ainda pode vir a se tornar viável economicamente, sendo a secagem propiciada por estes equipamentos objeto de estudos experimentais e de simulação numérica.

## 2.2. O Ciclone Separador de Partículas Sólidas

Desde os idos de 1930 vêm sido desenvolvidos inúmeros trabalhos experimentais que tratam da queda de pressão e eficiência de coleta em ciclones. Já no que tange a propostas de modelagem do escoamento do ar, com e sem a presença de partículas sólidas na corrente fluida, encontram-se as primeiras tentativas no final da década de 1950 (CREMASCO, 1994).

Em contrapartida à simplicidade de construção dos ciclones, tem-se o seu complexo comportamento fluidodinâmico, o qual apresenta fenômenos como alta preservação do vórtice, zonas de reversão do escoamento, regiões de recirculação, contato gás-sólido, alta intensidade de turbulência, entre outros (MEIER, 1998).

O interesse renovado no estudo do ciclone é resultado das exigências de se removerem partículas cada vez menores das emissões industriais, de tal forma que se trabalhe com alta eficiência de separação, especificamente em condições de alta pressão e temperatura, mesmo que acarrete maiores perdas de carga em determinadas aplicações. Nessas condições extremas de operação, o ciclone é o único equipamento de separação que pode ser usado em escala industrial, já que, em princípio, sua utilização é limitada apenas pelo material de que é construído (SOUZA, 1994).

As refinarias de petróleo representam um dos maiores campos de aplicação dos ciclones (ZENS, 1975), constituindo-se então em um dos ramos industriais com maior preocupação com o desenvolvimento constante desses equipamentos. Pode-se citar como

exemplo o problema de recuperação de catalisadores nas unidades de craqueamento catalítico de petróleo, nas quais a eficiência global de coleta é da ordem de 99%, e qualquer incremento nesse valor traz um benefício substancial, em virtude das quantidades utilizadas de catalisador e seu alto valor agregado (milhares de dólares), como demonstra o trabalho de KAUFF et al. (1996), comprovando a viabilidade da utilização do ciclone como parte do reator no processo de craqueamento catalítico (FCC), por ser o ciclone um equipamento que promove um pequeno tempo de contato entre o catalisador e o hidrocarboneto, uma exigência para a eficiência do processo.

Verifica-se, devida à complexa fenomenologia envolvida nesse simples equipamento, que qualquer tentativa de mudança estrutural ou operacional com o intuito de melhora de performance, tem como pré-requisito o profundo conhecimento da fluidodinâmica dos ciclones.

Como descrito em MEIER (1998), tem-se que a suspensão gás-particulados entra tangencialmente no ciclone, dando início ao movimento em vórtice na seção anular entre o tubo de saída e o corpo do equipamento, originando uma espiral gasosa descendente em seu interior. Devido à ação centrífuga do escoamento giratório, as partículas maiores migram em direção à parede interna do ciclone. Algumas, menores, atingem a parede externa do tubo de saída e deslizam praticamente coladas à parede. O mesmo movimento é observado nas partículas adjacentes à parede externa. No entanto, o comportamento apresentado resulta do choque com a parede e com outras partículas.

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, associada às parcelas convectivas e suas resultantes como força centrífuga e de coreolis, conduzem ao movimento giratório com reversão de fluxo e preservação de vorticidade. Os efeitos deste complexo comportamento fluidodinâmico em conjunto com os efeitos de geometria acarretam ainda as regiões de recirculação do gás, as quais elevam o tempo de residência das partículas, como demonstrado experimentalmente em trabalhos como o de PERES (1997) e CREMASCO (1994), e provocam erosão na estrutura metálica dos ciclones, devido à frequência dos choques com a parede. A Figura 2.1, apresentada por OGAWA (1997) e reproduzida por MEIER (1998), ilustra as características fenomenológicas de um ciclone.

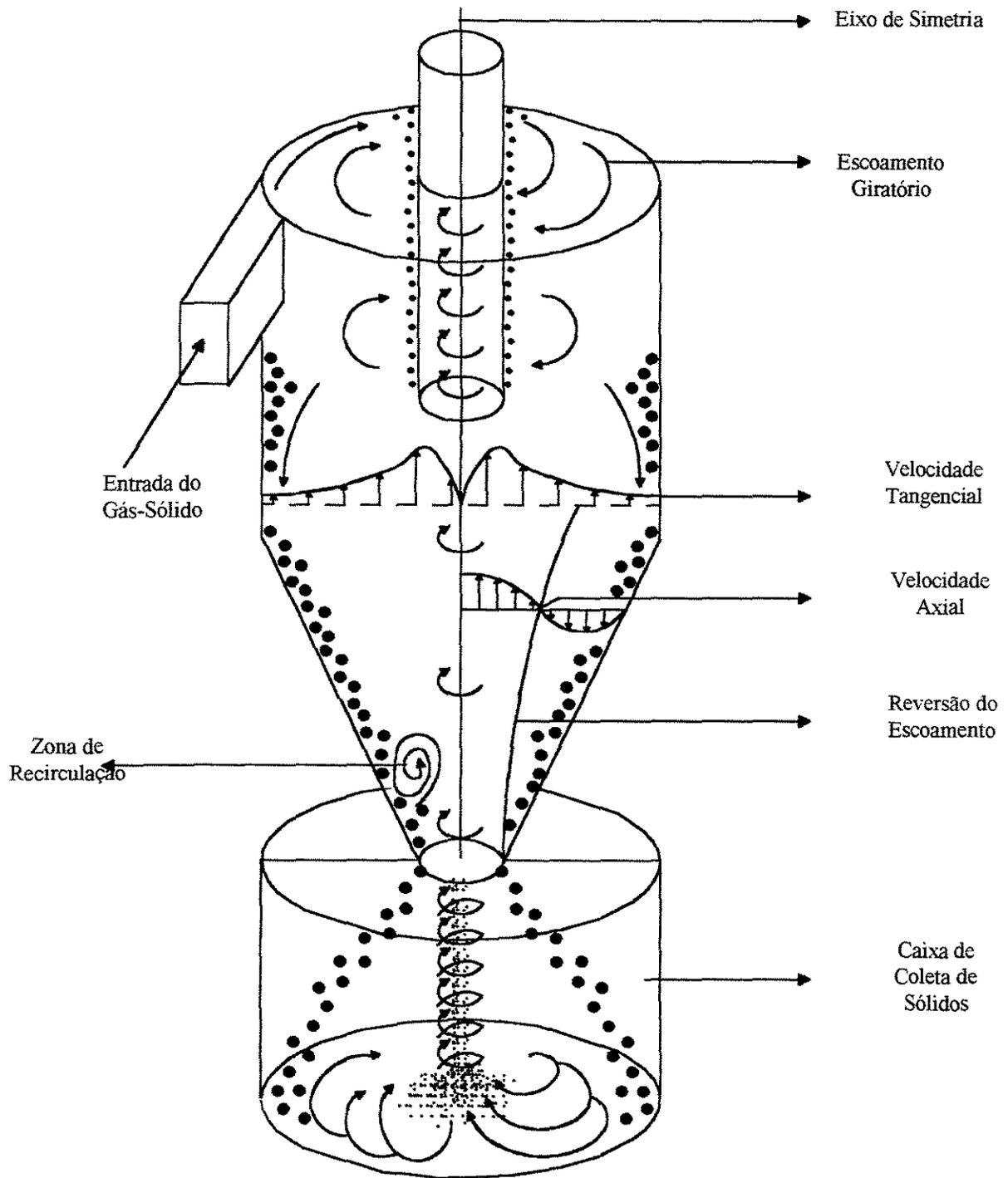


Figura 2.1 – O ciclone e suas características.

### 2.3. Projeto e Avaliação do Desempenho dos Ciclones

Os métodos comumente disponíveis para o projeto e avaliação da performance dos ciclones, principalmente quantificada pela alta eficiência de coleta e baixa queda de pressão, são de natureza empírica ou semi-empírica, particulares às situações em que foram coletados os dados experimentais, apresentando baixa confiabilidade na reprodução de resultados experimentais obtidos em planta.

Vários trabalhos experimentais apontaram para a necessidade de se ter maior conhecimento da fluidodinâmica inerente aos escoamentos em ciclones. No trabalho de PATTERSON e MUNZ (1996), conduzido em ciclones com seção cilíndrica de 0,102 m de diâmetro e quatro variações geométricas, relacionadas ora ao diâmetro ora ao comprimento do tubo de saída do gás (“vortex finder”), os autores realizaram um estudo da influência das variações geométricas nos campos de velocidade do gás e compararam as distribuições de velocidade tangencial obtidas experimentalmente com as previstas por métodos empíricos, como os de ALEXANDER (1949), MEISSNER e LOFFLER (1972), verificando a não adequação de tais métodos às condições experimentais específicas do trabalho experimental desenvolvido.

No tocante à predição da eficiência de coleta de particulados em ciclones, inúmeras propostas de metodologias de cálculo são encontradas na literatura, sendo que trabalhos recentes como os de BÜTTNER (1999), XIANG et al. (2001) e KIM et al. (2001) abordaram algumas das teorias classicamente empregadas, propondo também modelos empíricos apresentados aqui brevemente.

BÜTTNER (1999) utilizou duas configurações geométricas e obteve uma correlação adimensional da eficiência de coleta de ciclones pela aplicação de métodos de análise dimensional e fator de escala, incluindo a influência da temperatura e do diâmetro do ciclone na eficiência de coleta. O autor testou os modelos de BARTH (1956), LEITH e LICHT (1972), DIETZ (1981), MOTHE e LÖFFLER (1984), BÜRKHOLZ (1984) e BÜTTNER (1998) e salientou que todos os modelos para prever a performance dos ciclones incorreram em grandes erros, já que foram desenvolvidos para caracterizar principalmente o diâmetro de corte das partículas.

XIANG et al. (2001) realizaram experimentos de eficiência de coleta em três ciclones, variando o diâmetro do cone de saída dos sólidos, sendo que as teorias de predição usadas para comparação com os dados experimentais foram as de LEITH e LICHT (1972), BARTH (1956) e IOZIA e LEITH (1990). Os autores destacaram que as curvas de eficiência preditas que mais se aproximaram das experimentais foram as que utilizaram os métodos de BARTH (1956) e IOZIA e LEITH (1990). No entanto, ressaltaram que nenhuma delas foi capaz de prever satisfatoriamente a influência do diâmetro do cone no desempenho dos ciclones.

No trabalho de KIM et al. (2001), cinco diferentes ciclones foram utilizados, sendo as curvas de eficiência de coleta comparadas com as curvas preditas usando as teorias de LAPPLE (1950), BARTH (1956), LEITH e LICHT (1972) e DIETZ (1981). Neste caso, os melhores resultados foram obtidos quando a teoria de DIETZ (1981) foi empregada. A simples inspeção dos trabalhos clássicos apresentados aqui, permite constatar a inadequação da utilização das correlações empíricas de predição de eficiência de coleta, frente à gama de variações geométricas dos ciclones e condições de processo encontradas atualmente.

#### **2.4. Aplicação das Técnicas de CFD em Ciclones**

Com a utilização de ciclones em novos processos, como reatores e recuperadores de catalisadores de alto valor agregado, por exemplo, surge a necessidade premente de um conhecimento mais profundo sobre o campo de velocidade, o campo de pressão e a turbulência em ciclones, de forma a permitir a otimização da performance do equipamento. Este nível de conhecimento só é possível com a solução completa das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, sujeitas a um modelo rigoroso de turbulência. Surgiram, então, as modernas técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) como ferramentas para a obtenção de soluções numéricas completas que permitem a predição de fenômenos como a reversão do escoamento, o escoamento de alta vorticidade, a existência de zonas de recirculação, entre outros (MEIER e MORI, 1997).

A primeira aplicação das técnicas de CFD para a simulação de ciclones foi apresentada por BOYSAN et al. (1982), em que os autores utilizaram as equações médias

temporais de Navier-Stokes para a fase contínua acopladas a um modelo de turbulência anisotrópico, por intermédio da combinação do modelo k- $\epsilon$  padrão e um modelo de tensões algébricas. Trata-se de um trabalho de vanguarda, ao se levar em conta os poucos recursos computacionais existentes na época, tanto no que se refere aos métodos numéricos bem como aos próprios computadores.

A partir do trabalho pioneiro de BOYSAN et al. (1982), diversas tentativas com o intuito de melhorar a representação dos campos de velocidade com modificações dos modelos de turbulência são encontradas na literatura. Dentre os trabalhos, destacam-se os de DUGGINS e FRITH (1987), PERICLEOUS (1987), ZHOU e SOO (1990), DYAKOWSKI e WILLIAMS (1993), MADSEN et al. (1994) e MEIER e MORI (1996), sendo que em todos esses, as principais simplificações adotadas são a simetria axial, a qual permite a solução de um modelo bidimensional, bem como a hipótese de que a fase particulada não interfere significativamente no campo de escoamento da fase contínua, acarretando assim a redução do número de equações diferenciais parciais do modelo.

#### **2.4.1. Simulação Bidimensional de Ciclones**

Com a adoção da simplificação da simetria axial, ou seja, tratando o problema como bidimensional, MEIER (1998) avançou significativamente na representação do escoamento no interior ciclônico. Para tanto, o autor desenvolveu um código computacional específico para ciclones, utilizando o método dos volumes finitos, denominado CICLO. O código emprega três modelos distintos, um para a simulação do escoamento do gás sem a presença de particulados, e os outros dois dedicados ao escoamento gás-particulados, sendo um com abordagem Euleriana e o outro com abordagem Lagrangeana, com acoplamento pressão-velocidade do tipo SIMPLE e malha numérica desencontrada, para a solução das equações provenientes dos três modelos. O autor comparou os resultados obtidos nas simulações com quatro estudos de caso retirados da literatura e observou que o código desenvolvido forneceu importantes subsídios aos estudos de melhoria de performance de ciclones, quantificada, principalmente, por reduzida queda de pressão e elevada eficiência de coleta.

MEIER e MORI (1998, 1999) utilizando o código computacional CICLO, desenvolvido por MEIER (1998), propuseram um modelo baseado na abordagem Euleriana para ambas as fases, com o intuito de avaliar os efeitos da presença de particulados no escoamento do gás em ciclones. Foi possível prever a redução do pico de velocidade tangencial, devido à presença dos particulados, responsável pela redução da queda de pressão. O escoamento da fase particulada foi considerado invíscido e apenas um modelo para a força de arraste foi usado para a interação gás-particulado. Os autores utilizaram o modelo de turbulência k- $\epsilon$  padrão em conjunto com a teoria do comprimento de mistura de Prandtl, para que o modelo apresentasse comportamento anisotrópico dos tensores de Reynolds na fase gasosa. A malha numérica utilizada foi uma malha deslocada e o modelo gás-particulados foi usado para simular o escoamento de gás e partículas esféricas de vidro. MEIER e MORI (1998, 1999) lançaram mão da hipótese da simetria axial, e o modelo se mostrou capaz de analisar a anisotropia dos tensores de Reynolds. A validação dos modelos 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. Os principais resultados revelaram que somente 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 os efeitos do sistema de coleta nos campos de velocidade e pressão do gás.

Ainda utilizando o código computacional CICLO, MEIER et al. (2002a, 2002b) realizaram a validação numérica dos resultados experimentais de distribuição da velocidade tangencial do ar obtidos por CRISTEA et al. (1998), obtendo bons resultados. Em uma segunda etapa, os autores partiram para a predição do comportamento fluidodinâmico do escoamento gás-particulados em um ciclone industrial com entrada em voluta cujo diâmetro da coluna cilíndrica é de 7,50 m e altura total de 16,0 m, com ênfase na predição da eficiência de coleta e queda de pressão do equipamento. Uma importante constatação destes trabalhos foi a visualização de um estado estacionário periódico instável com partículas de pequeno diâmetro que pode ser responsável pelo fenômeno da avalanche dos particulados que também é observado na indústria. A visualização científica do escoamento gás-particulados permitiu melhor avaliação dos fenômenos inerentes ao escoamento ciclônico, sendo importante ferramenta na posterior otimização de ciclones com esta configuração, a qual é bastante empregada na indústria de cimento.

No trabalho de HOEKSTRA et al. (1999), foram realizados experimentos em um ciclone com entrada tangencial, com diâmetro da coluna cilíndrica de 0,29m e três variações do diâmetro do “vortex finder” (0,108m, 0,135m e 0,19m). Os resultados de distribuição dos componentes de velocidade tangencial e axial foram obtidos por intermédio de medidas com LDV (“Laser Doppler Velocimetry”). A hipótese da simetria axial foi adotada e o código comercial FLUENT foi utilizado nas simulações. Avaliaram-se os modelos de turbulência na predição do campo de escoamento turbulento do gás em ciclones. Os modelos empregados foram o modelo k- $\epsilon$  padrão, o modelo RNG k- $\epsilon$  (“Re-Normalization Group”), ambos isotrópicos e o modelo DSM (“Differential Stress Model”), anisotrópico.

Observou-se experimentalmente que a redução do diâmetro do “vortex finder” resultou no aumento da velocidade tangencial máxima entre 1 e 2,5 vezes a velocidade de entrada do ar, enquanto a velocidade axial máxima praticamente dobrou. Os resultados da simulação indicaram que tanto o modelo k- $\epsilon$  padrão como o RNG k- $\epsilon$  forneceram resultados não passíveis de corroboração, quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente. Já o modelo DSM foi capaz de reproduzir qualitativamente as distribuições de velocidade tangencial quando comparadas com as distribuições medidas experimentalmente.

SUASNABAR e FLETCHER (1999) desenvolveram um código computacional com o intuito de simular o escoamento em um ciclone, bastante empregado na indústria da mineração, tendo sido avaliados além de modelos de turbulência, modelos reológicos Newtonianos e não Newtonianos. O código proposto admitiu simetria axial, abordagem Lagrangeana da fase particulada e adotou o modelo de turbulência DSM. Os autores verificaram que os efeitos provenientes do escoamento turbulento exerceram grande influência na trajetória das partículas enquanto que a adoção de um modelo reológico, Newtoniano ou não, pouco alterou as trajetórias, bem como o tempo de residência das partículas no ciclone. Os autores verificaram que o efeito da turbulência do escoamento se sobrepôs à influência da utilização de um modelo reológico não Newtoniano.

### 2.4.2. Códigos Desenvolvidos para a Simulação Tridimensional de Ciclones

Encontram-se na literatura poucos trabalhos de desenvolvimento de códigos computacionais direcionados exclusivamente a ciclones que não utilizam a hipótese da simetria axial, ou seja, modelos de simulação tridimensional. Destacam-se os trabalhos de NOWAKOWSKI et al. (2000), aplicado a hidrociclones e MA et al. (2000), para mini ciclones.

NOWAKOWSKI et al. (2000) propuseram um modelo para simulação tridimensional de escoamentos multifásicos no interior de hidrociclones. Neste modelo, o líquido é descrito como um contínuo e cada fração de partícula, com seu tamanho característico, é descrito como um contínuo segregado. Os autores empregaram o método dos elementos finitos e um conjunto de equações diferenciais parciais, equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, sendo que a malha numérica sugerida é não estruturada, composta por elementos tetraédricos. Contudo, estudos dos modelos de turbulência não foram abordados neste trabalho, pois a preocupação dos autores foi apenas se limitar a sugerir modelos e malhas para hidrociclones, sem se aprofundar nas simulações e validação dos modelos propostos.

MA et al. (2000) apresentaram simulações numéricas de escoamentos de fluido e particulados em uma série de pequenos ciclones que foram estudados 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  $k-\epsilon$  foram resolvidas usando o método dos volumes finitos. Como resultado, MA et al. (2000) obtiveram uma boa concordância entre as previsões numéricas e os poucos dados experimentais disponíveis de KIM et al. (1990).

### 2.4.3. Códigos Comerciais para a Simulação Tridimensional de Ciclones

Com o constante aperfeiçoamento dos códigos computacionais comerciais disponíveis no mercado, os quais utilizam o método dos volumes finitos, tem sido viabilizada a simulação tridimensional de equipamentos de escoamento complexo como os ciclones. Os códigos comerciais mais empregados têm sido o CFX e o FLUENT.

No entanto, no que se refere à utilização das técnicas de fluidodinâmica computacional na modelagem e simulação tridimensional de ciclones, encontram-se ainda poucos trabalhos na literatura, dentre os quais, destacam-se os de CRISTEA e COGHE (1998), WITT et al. (1999), MONTAVON et al. (2000) e SLACK et al. (2000).

CRISTEA e COGHE (1998) realizaram um estudo experimental e a simulação numérica tridimensional de um escoamento gás-particulados concentrado, analisando os componentes vetoriais da velocidade média e flutuante, queda de pressão e eficiência global de coleta para a fase contínua (gás) e descontínua (gás-partícula). As medidas experimentais foram realizadas com o auxílio de um LDA (“Laser Doppler Anemometer”), em quatro alturas ao longo do ciclone, cuja entrada é em voluta e o diâmetro da coluna cilíndrica é de 0,288m. A simulação numérica foi realizada usando o código comercial FLUENT, baseado no método dos volumes finitos. Em trabalhos anteriores, CRISTEA et al. (1994, 1996) já haviam constatado que o escoamento altamente giratório em ciclones foi melhor representado quando utilizado o modelo de turbulência DSM (“Differential Stress Model”). Sendo assim, CRISTEA e COGHE (1998) adotaram o modelo DSM nas simulações, com sistema de acoplamento pressão-velocidade SIMPLE e esquema de interpolação “higher upwind”. A solução convergente do campo de escoamento da fase gasosa foi usada como solução inicial na simulação do escoamento da fase particulada, obtida em uma abordagem Lagrangeana. Os resultados computacionais apresentaram boa concordância com os dados experimentais para os componentes da velocidade média na fase gasosa, permitindo-se a observação de regiões de formação de vórtice e zonas de recirculação do escoamento no interior ciclônico. As trajetórias previstas para as partículas sólidas de diferentes tamanhos no interior ciclônico podem vir a fornecer subsídios importantes para novos projetos de ciclones.

No trabalho de WITT et al. (1999), um modelo fluidodinâmico para a predição do escoamento do gás em um ciclone com entrada tangencial, utilizando o código CFX, foi validado utilizando para comparação dados experimentais de distribuição de velocidade tangencial e axial obtidos por intermédio do uso de LDV (“Laser Doppler Velocimetry”) em seis alturas (pontos de medida) ao longo do ciclone. A malha numérica usada constituiu-se de aproximadamente 110.000 células e os modelos de turbulência k- $\epsilon$  padrão e DSM foram comparados. Os resultados obtidos na malha tridimensional corroboraram as observações de CRISTEA e COGHE (1998), MEIER e MORI (1999) e HOEKSTRA et al. (1999), entre outros, constatando a inadequação da utilização do modelo k- $\epsilon$  na representação do escoamento turbulento em ciclones.

SLACK et al. (2000) fizeram uma revisão da aplicação das técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para a modelagem do escoamento do gás em ciclones por meio de malhas não estruturadas tridimensionais, usando os modelos de turbulência DSM (“Differential Stress Model”) e LES (“Large Eddy Simulation”). Resultados experimentais foram coletados em um ciclone de alta eficiência, com diâmetro da coluna cilíndrica de 0,205m, e de configuração clássica, tipo STAIRMAND (1951). As distribuições dos componentes de velocidade axial e tangencial foram obtidas em oito alturas ao longo do ciclone por intermédio de um LDA (“Laser Doppler Anemometry”). As simulações numéricas foram realizadas usando o código comercial FLUENT, com o uso do algoritmo SIMPLE para o acoplamento das equações da continuidade e momento, e o esquema de interpolação QUICK.

Os autores destacaram que as simulações, em regime permanente, usando o modelo DSM em malha não estruturada e não refinada (aproximadamente 40.000 células), forneceram um método de tempo computacional não oneroso para se examinar em detalhes os campos de escoamento em ciclones. A solução obtida com o modelo DSM foi usada como condição inicial para a implantação do modelo LES, que exigiu maior esforço computacional, já que houve a necessidade de maior refinamento da malha numérica ( a malha utilizada tem aproximadamente 640.000 células). Os resultados mostraram excelente concordância entre os valores preditos pelos modelos e aqueles obtidos experimentalmente em todos os pontos axiais em que foram feitas as medidas. Diante da proximidade das soluções numéricas obtidas com os dois modelos, pode-se concluir deste trabalho que o modelo DSM talvez seja uma melhor alternativa de solução ao requerer malhas menos

refinadas que o modelo LES, e por conseguinte, menor tempo de CPU para a obtenção das soluções.

MONTAVON et al. (2000) apresentaram resultados computacionais de simulação tridimensional de ciclones em que foram analisados os modelos de turbulência k- $\epsilon$  padrão, um modelo k- $\epsilon$  modificado para curvaturas e o modelo DSM. As simulações do escoamento do gás foram realizadas em regime transiente e com a utilização do código comercial CFX, versão 5.0. A aplicação dos modelos foi testada em um ciclone tipo STAIRMAND (1951) e em um hidrociclone tipo Bradley.

O estudo de caso utilizado por MONTAVON et al. (2000) para ciclones foi o de GRIFFITHS e BOYSAN (1996), no qual apenas dados de queda de pressão foram analisados em um ciclone de alta eficiência da classe STAIRMAND (1951) com diâmetro da coluna cilíndrica de 0,305m. A malha consistia de cerca de 57.000 células e boa concordância para os dados de queda de pressão foram observados em todos os modelos, embora a escassez de resultados experimentais para validação dos modelos tenha sido salientada pelos autores. O estudo de caso utilizado para a simulação de hidrociclones foi o de GROTTJANS (1999) e construiu-se uma malha com aproximadamente 150.000 células. Os dados experimentais da distribuição de velocidade tangencial em cinco alturas ao longo do equipamento foram comparados com os resultados numéricos e comprovaram o melhor desempenho do modelo DSM frente aos modelos k- $\epsilon$  padrão e k- $\epsilon$  modificado para curvaturas.

Desta forma, os resultados encontrados na literatura mostraram a viabilidade da simulação tridimensional de ciclones com modelo de turbulência anisotrópico (DSM) usando as técnicas de CFD, face aos recursos computacionais vigentes. Indicaram também a existência de muitas lacunas na aplicação de tais técnicas na resolução do escoamento do gás e principalmente do escoamento gás-particulados em ciclones, encorajando assim o desenvolvimento desta Tese.

## CAPÍTULO 3

### MÉTODOS NUMÉRICOS

Neste capítulo aborda-se a modelagem matemática, na qual são apresentadas as equações que governam o fenômeno, além das condições de contorno utilizadas nas simulações, o método dos volumes finitos e suas peculiaridades, bem como uma breve descrição do código computacional CFX utilizado neste trabalho.

#### 3.1. Modelagem Matemática

A modelagem matemática abordada neste tópico tem como premissa o fato de que o fenômeno de turbulência é inerente ao escoamento ciclônico nas faixas de velocidades de entrada do ar normalmente utilizadas e estudadas neste trabalho. Consequentemente, a modelagem da turbulência já está inserida nas equações de balanço, advinda da aplicação do método de decomposição de Reynolds.

Aplicam-se as propriedades médias temporais nas equações de balanço, tomando-se um intervalo de tempo  $\Delta t$  suficientemente grande para que o valor médio das flutuações turbulentas instantâneas seja nulo, mas necessariamente pequeno para que as variações no decorrer do tempo sejam identificadas, resultando nas equações básicas que descrevem o modelo, correspondentes às equações de conservação de massa e momento. Salienta-se que a barra indicando a média ficará implícita para todas as variáveis primitivas.

As equações de conservação, tanto as equações da continuidade quanto as equações de movimento, podem ser escritas na sua forma generalizada, sendo que, para o escoamento bifásico (gás-particulados), assume-se que ambas as fases estão presentes em cada volume de controle, atribuindo-se um valor de fração volumétrica para cada fase.

- Equações da Continuidade

$$\text{Fase Gás: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \xi) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \xi \bar{\mathbf{u}}_g) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Fase Particulada: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho_p (1-\xi)) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_p (1-\xi) \bar{\mathbf{u}}_p) = 0 \quad (3.2)$$

em que  $\rho_g$  e  $\rho_p$  correspondem respectivamente à massa específica da fase gasosa e da fase particulada;  $\xi$  é a fração volumétrica da fase gasosa,  $\bar{\mathbf{u}}_g$  e  $\bar{\mathbf{u}}_p$  são os vetores velocidade das fases gasosa e particulada, respectivamente.

- Equações de Movimento

$$\text{Fase Gás: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \xi \bar{\mathbf{u}}_g) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \xi \bar{\mathbf{u}}_g \bar{\mathbf{u}}_g) = S_g \quad (3.3)$$

$$\text{em que: } S_g = -\xi \vec{\nabla} P + \rho_g \xi \bar{\mathbf{g}} + \beta(\bar{\mathbf{u}}_p - \bar{\mathbf{u}}_g) + \vec{\nabla} \cdot T_g \quad (3.4)$$

$$\text{Fase Particulada: } \frac{\partial}{\partial t}(\rho_p (1-\xi) \bar{\mathbf{u}}_p) + \vec{\nabla} \cdot (\rho_p (1-\xi) \bar{\mathbf{u}}_p \bar{\mathbf{u}}_p) = S_p \quad (3.5)$$

$$\text{na qual: } S_p = -(1-\xi) \vec{\nabla} P + \rho_p (1-\xi) \bar{\mathbf{g}} + \beta(\bar{\mathbf{u}}_g - \bar{\mathbf{u}}_p) + G(\xi) \vec{\nabla} \xi \quad (3.6)$$

sendo que  $\beta$  é o coeficiente de arraste gás-partícula,  $T_g$  é o tensor viscoso,  $\bar{\mathbf{g}}$  é a aceleração gravitacional,  $P$  é a pressão do sistema e  $G(\xi)$  é o módulo de elasticidade.

### 3.1.1. Equações de Fechamento

As equações de fechamento são necessárias para que se conheça o coeficiente de interface entre a fase particulada e a fase gasosa, sendo equações que se caracterizam por sua natureza empírica ou experimental. O coeficiente de arraste gás-sólido ( $\beta$ ) é dado por:

$$\beta = 150 \frac{(1-\xi)^2 \mu_g}{\xi (d_p \Phi_p)^2} + 1,75 \frac{\rho_g (1-\xi) \left[ \overline{u_g} - \overline{u_p} \right]}{d_p \Phi_p} \quad (3.7)$$

para  $\xi < 0,8$ , ou seja, para escoamentos em que a fração volumétrica da fase gasosa é menor do que 0,8, típicos de escoamentos em fase densa, ou:

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_g \xi (1-\xi) \left[ \overline{u_g} - \overline{u_p} \right]}{d_p \Phi_p} \quad (3.8)$$

para  $\xi > 0,8$ , isto é, escoamentos em fase diluída. Sendo que  $d_p$  é o diâmetro da partícula,  $\phi_p$  é a esfericidade da partícula e  $C_D$  é o coeficiente de arraste.

#### Coeficiente de Arraste ( $C_D$ ):

O arraste exercido por um fluido sobre um corpo imerso é devido a dois mecanismos. O primeiro é devido à tensão de cisalhamento viscosa na superfície do corpo e é chamada de atrito de pele e o segundo é devido à distribuição de pressão em torno do corpo, sendo chamada de atrito de forma. O arraste resultante do conjunto destes dois mecanismos é normalmente correlacionado em termos do coeficiente de arraste ( $C_D$ ).

O coeficiente de arraste pode ser obtido para partículas individuais, gotas e bolhas de acordo com o regime de escoamento. Para regimes viscosos, tanto o fator de pele quanto

o fator de forma são importantes no arraste das partículas, sendo que o coeficiente de arraste decresce monotonicamente com o número de Reynolds. Já em regimes turbulentos, há a predominância do fator de forma sobre o fator de pele e o coeficiente de arraste passa a ser independente do número de Reynolds.

Dentre as muitas correlações encontradas na literatura, faz-se uso daquela proposta por SCHILLER e NAUMAN (1933), equação (3.9) aplicada para um regime viscoso e de transição, e a expressão dada pela equação (3.10) aplicada para um regime turbulento ou de Newton.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left[ 1 + 0,15(Re_p)^{0,687} \right], \text{ para } Re_p < 1000 \quad (3.9)$$

$$C_D = 0,44 \quad , \text{ para } Re_p \geq 1000 \quad (3.10)$$

$$Re_p = \left( \frac{\xi \rho_g |\overline{u_g} - \overline{u_p}| d_p}{\mu_g} \right) \quad (3.11)$$

em que  $Re_p$  é o número adimensional de Reynolds para a partícula.

### Pressão na Partícula

A pressão na fase particulada é mais difícil para interpretar do que a pressão na fase gasosa. Uma das expressões usadas para descrever a pressão na partícula é baseada nas propriedades das partículas e na porosidade local. De acordo com esta formulação a pressão na fase particulada é formada pela soma de três efeitos causados pelas correções das flutuações de velocidade (geralmente desprezível), pela interação entre as partículas e pela contribuição da pressão da fase gasosa.

Vários modelos para representar a influência das colisões entre as partículas foram formulados. O termo proveniente das interações entre as partículas tem a função de mantê-las afastadas uma das outras de tal modo que a concentração da partícula calculada não exceda a concentração máxima obtida para uma dada esfericidade e distribuição de tamanho de partícula. Para tal, definimos um parâmetro denominado Módulo de Elasticidade ( $G(\xi)$ ) para representar as colisões partícula-partícula, conforme apresentado por GIDASPOW (1994).

$$G(\xi) = e^{-600(\xi-0.376)} \quad (3.12)$$

### 3.1.2. Modelos de Turbulência

As equações de fechamento que relacionam o produto da flutuação da velocidade com as velocidades médias-temporais são ainda consideradas uma questão em aberto na literatura, de tal sorte que encontram-se várias tentativas e formas de se caracterizar e modelar os tensores de Reynolds.

Basicamente, nas aplicações dentro da engenharia, têm-se duas grandes vertentes de fechamento dos modelos de turbulência, uma baseada na hipótese da viscosidade turbulenta e outra conhecida como fechamento de segunda ordem (GARDE, 1994; LIXING, 1993).

#### Hipótese da Viscosidade Turbulenta

Os modelos que seguem a hipótese da viscosidade turbulenta assumem a hipótese de Boussinesq, em que o tensor de Reynolds apresenta uma relação com as propriedades médias-temporais similar à relação do tensor tensão no escoamento laminar Newtoniano, e negligenciam todas as correlações de segunda ordem entre as propriedades de flutuação que aparecem durante a aplicação do procedimento de decomposição de Reynolds.

Os tensores de Reynolds na fase gasosa são expressos por:

$$-\overline{\rho u'_g u'_g} = -\frac{2}{3}\rho k\delta - \frac{2}{3}\mu_T \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_g \right) \delta + \mu_T \left[ \vec{\nabla} \vec{u}_g + \left( \vec{\nabla} \vec{u}_g \right)^T \right] \quad (3.13)$$

na qual  $\mu_T$  é a viscosidade turbulenta e é prescrita de maneira distinta em cada um dos modelos de turbulência empregados.

A equação do momento fica:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}_g) + \vec{\nabla} (\rho \vec{u}_g \vec{u}_g) = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p' + \vec{\nabla} \cdot \left\{ \mu_{\text{eff}} \left[ \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_g + \left( \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_g \right)^T \right] \right\} \quad (3.14)$$

sendo:

$$\mu_{\text{eff}} = \mu_T + \mu \quad (3.15)$$

em que  $\mu_{\text{eff}}$  é a viscosidade efetiva e  $p'$  é uma pressão modificada definida por:

$$p' = p + \frac{2}{3}\rho k + \frac{2}{3}\left( \vec{\nabla} \cdot \vec{u}_g \right) \quad (3.16)$$

Os modelos da hipótese da viscosidade turbulenta se distinguem pelo modo que a viscosidade é prescrita, sendo o modelo de turbulência k- $\epsilon$  padrão o mais popular, devido a seu amplo grau de aplicabilidade.

No modelo k- $\epsilon$  padrão, a viscosidade turbulenta é calculada por:

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

O modelo k-ε apresenta duas equações diferenciais de transporte, uma para a energia cinética turbulenta (k) e a outra para a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (ε):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_g k) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma^k} \right) \nabla k \right] + G - \rho \varepsilon \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_g \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma^\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \rho \varepsilon) \quad (3.19)$$

em que G é a geração de turbulência, expressa por:

$$G = \mu_{\text{eff}} \nabla \bar{u}_g \cdot \left[ \nabla \bar{u}_g + (\nabla \bar{u}_g)^\top \right] - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}_g) \left[ \mu_{\text{eff}} (\nabla \cdot \bar{u}_g) + \rho k \right] \quad (3.20)$$

sendo que  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma^k$  e  $\sigma^\varepsilon$  são constantes do modelo.

Uma alternativa a este modelo para escoamentos com alto número de Reynolds é o modelo RNG k-ε, advindo de um processo de renormalização de grupos aplicado às equações de Navier-Stokes. Este modelo difere do modelo k-ε padrão apenas no tocante a uma modificação na equação para o cálculo de ε e nas constantes do modelo. A equação para ε fica:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \bar{u}_g \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma^\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} G (C_1 - C_{1\text{RNG}}) - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.21)$$

em que:

$$C_{1\text{RNG}} = \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0}\right)}{(1 + \beta \eta^3)} \quad (3.22)$$

$$\eta = \left(\frac{G_S}{\mu_T}\right) \frac{k}{\varepsilon} \in \quad (3.23)$$

$$G_S = \mu_{\text{eff}} \nabla v \cdot \left[ \nabla v + (\nabla v)^T \right] \quad (3.24)$$

sendo que  $\eta_0$  e  $\beta$  são constantes adicionais do modelo.

Observa-se que os modelos que seguem a hipótese da viscosidade turbulenta apresentam comportamento isotrópico para os tensores de Reynolds. No próximo tópico, o modelo de fechamento de segunda ordem é apresentado.

### Fechamento de Segunda Ordem

No caso do fechamento de segunda ordem, o modelo de turbulência considera as correlações de segunda ordem entre as flutuações turbulentas e apresenta comportamento altamente anisotrópico para os tensores de Reynolds. O modelo utilizado neste trabalho é o modelo dos Tensores de Reynolds, tratado aqui pela sigla DSM (“Differential Stress Model”).

O modelo DSM tem uma equação diferencial, ou equação de transporte, para cada componente dos tensores de Reynolds, podendo ser expresso por:

$$\frac{\partial (\overline{\rho u_g' u_g'})}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho u_g' u_g' u_g'}) = \nabla \cdot \left[ \rho \frac{C_s}{\sigma_{DS}} \frac{K}{\varepsilon} \overline{u_g' u_g'} (\nabla u_g' u_g')^T \right] + \delta - \phi - \frac{2}{3} \rho \varepsilon \mathbf{I} \quad (3.25)$$

sendo que  $\mathbf{I}$  é o tensor identidade e  $\delta$  é o tensor da tensão de cisalhamento, dado por:

$$\delta = -\rho \left[ \overline{u_g' u_g'} (\nabla u_g')^T + (\nabla u_g') \overline{u_g' u_g'} \right] \quad (3.26)$$

e  $\phi$  é a correlação pressão-tensão para fluxo incompressível advinda de:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 \quad (3.27)$$

$$\phi_1 = -\rho C_{1S} \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u_g' u_g'} - \frac{2}{3} K \mathbf{I} \right) \quad (3.28)$$

$$\phi_2 = -C_{2S} \left( \delta - \frac{2}{3} P \mathbf{I} \right) \quad (3.29)$$

em que  $C_s(0,22)$ ,  $C_{1S}(2,50)$ ,  $C_{2S}(0,55)$  e  $\sigma_{DS}(1,0)$  são constantes do modelo.

A taxa de dissipação da energia cinética turbulenta é dada pela Equação 3.30:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho u_g \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \rho \frac{C_s}{\sigma_\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} (\overline{u_g' u_g'}) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.30)$$

com  $k$  sendo obtido diretamente de sua definição, isto é,  $(k = 1/2 \overline{u_g'^2})$  e  $C_1(1,44)$ ,  $C_2(1,92)$  são constantes do modelo.

### 3.2. Condições de Contorno

Para ambas as fases, as condições de contorno para a entrada são definidas como distribuição de velocidade uniforme, já para o tubo de saída é definida como continuidade de fluxo para todas as variáveis, exceção feita à pressão, a qual é prescrita.

Nas paredes, para a fase gasosa, define-se que a velocidade é nula, pela hipótese da aderência da fase à superfície da parede, sendo que nas suas proximidades as variações nas propriedades turbulentas são ajustadas por funções de parede, as quais são formuladas usando o conceito de que a região próxima da parede é uma área de tensão de cisalhamento constante, de acordo com evidências experimentais para uma gama de escoamentos. Com isto, assume-se uma distribuição de velocidade logarítmica próximo à parede. Já para a fase particulada, adota-se a condição de escorregamento com atrito zero (MANUAL DO CFX, 2001).

### 3.3. Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos, ou volumes de controle, consiste primeiramente na divisão do domínio do problema em volumes finitos, formando, assim, uma malha computacional. Posteriormente, efetua-se a integração, em um volume elementar, da equação diferencial para cada uma das variáveis dependentes do modelo. Assim, a conservação das propriedades envolvidas fica satisfeita em cada volume elementar da malha e, conseqüentemente, em todo o domínio de solução. Deste procedimento deriva um sistema de equações algébricas envolvendo todas as variáveis do modelo. A partir da resolução do sistema de equações algébricas lineares, obtém-se, finalmente, a distribuição da propriedade no domínio do problema.

O método dos volumes finitos é amplamente descrito na literatura em obras como as de MALISKA (1995) e PATANKAR (1980), entre outros, e sua aplicação é discutida em recentes trabalhos do Laboratório de Modelagem e Simulação de Processos Químicos (LMSPQ), tais como o de MOREIRA (2002), ROSA (2002), RIBEIRO (2001) e FUDIHARA (2000). Desta forma, neste trabalho, dar-se-á ênfase ao processo de integração numérica e linearização, tipos de acoplamento pressão-velocidade e os algoritmos de resolução das equações algébricas empregados pelo código CFX.

### 3.3.1. Integração Numérica e Linearização

Com o intuito de simplificar a nomenclatura empregada, apresentam-se as equações considerando um sistema monofásico. Parte-se da equação genérica para as equações de transporte:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho\phi\vec{v}) = \nabla \cdot (\Gamma_{\phi}\nabla\phi) + S_{\phi} \quad (3.31)$$

na qual  $\phi$  representa uma variável dependente generalizada,  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a massa específica,  $\vec{v}$  é o vetor velocidade,  $\Gamma_{\phi}$  o coeficiente difusivo e  $S_{\phi}$  é o termo fonte.

A equação é integrada no volume de controle  $\Delta V$  de área superficial  $\Delta A$ :

$$\int \frac{\partial \rho\phi}{\partial t} dV + \int \rho\phi\vec{v} \cdot \vec{n} dA = \int \Gamma_{\phi}\nabla\phi \cdot \vec{n} dA + \int S_{\phi} dV \quad (3.32)$$

Verifica-se portanto que se tem quatro integrais a serem resolvidas: o termo transiente, o termo convectivo, o termo difusivo e o termo fonte, respectivamente.

#### Termo Transiente

Integra-se numericamente o termo transiente num intervalo de tempo  $\Delta t$ , aplicando a formulação totalmente implícita que, com o uso da aproximação *Backward Euler*, resulta em:

$$\int \frac{\partial \rho\phi}{\partial t} dV = (\rho^n f_1 \phi_p^n - \rho^{n-1} f_2 \phi_p^{n-1} - \rho^{n-2} f_3 \phi_p^{n-2}) \quad (3.33)$$

sendo que os coeficientes  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  equivalem a  $(\Delta t)^{-1}$ ,  $(\Delta t)^{-1}$  e 0, respectivamente, para formulações de primeira ordem e  $\frac{2\Delta t + \Delta t_0}{\Delta t(\Delta t + \Delta t_0)}$ ,  $\frac{\Delta t + \Delta t_0}{\Delta t\Delta t_0}$  e  $\frac{\Delta t}{\Delta t(\Delta t + \Delta t_0)}$  para formulações de segunda ordem ou quadráticas. O sobrescrito  $n$  associa-se ao instante de tempo entre os passos de tempo,  $\phi_p$  é o valor de  $\phi$  no ponto central  $P$  e  $\Delta t_0$  é o passo de tempo da iteração anterior (MANUAL DO CFX, 2001).

### Termo Convectivo

No termo convectivo, a integração resulta em:

$$\int \rho \phi \bar{v} \cdot \bar{n} dA = \sum_P^3 (F_1 A_1 \phi_1 - F_0 A_0 \phi_0) \quad (3.34)$$

na qual o somatório se refere às três coordenadas e o subscrito do somatório indica que a integração está sendo realizada no volume centrado em  $P$ , sendo  $F$  o fluxo convectivo  $(\rho \bar{v})$ .

Os termos convectivos merecem especial atenção quando se trabalha com malhas co-localizadas. Na integração desses termos, as variáveis da interface devem ser aproximadas pelos valores dos centros, o que é feito por meio de esquemas de interpolação, os quais são determinantes na precisão da solução. O tratamento destes termos é delicado, pois à medida que um esquema é mais acurado, em contrapartida tende a ser menos robusto ou mais lento. Encontram-se no código CFX várias opções de esquemas de interpolação que podem ser utilizados, no entanto, serão aqui colocados os esquemas de interpolação efetivamente empregados neste trabalho.

## Esquema das Diferenças Centrais

Tem-se que a variável da interface é substituída pela média das variáveis dos pontos centrais dos volumes adjacentes, ou seja, usa-se uma interpolação linear:

$$\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2} \quad ; \quad \phi_w = \frac{\phi_W + \phi_P}{2} \quad (3.35)$$

Esquema “*upwind*”

Neste esquema de interpolação, as variáveis nas interfaces adotam o valor central da célula que está a montante em relação à direção do componente do vetor velocidade do fluxo convectivo em questão. Sendo assim, o esquema “*upwind*” tem sua relação direta com o termo parabólico, tem-se (MALISKA, 1995):

$$\phi_w = \phi_W \quad ; \quad \phi_e = \phi_P \quad , \text{ para } u > 0 \quad (3.36)$$

$$\phi_w = \phi_P \quad ; \quad \phi_e = \phi_E \quad , \text{ para } u < 0 \quad (3.37)$$

Esquema “*higher upwind*”

Enquanto os dois esquemas apresentados anteriormente são de primeira ordem, o “*higher upwind*” é um esquema de segunda ordem de acuidade, já que extrapola valores da face de dois pontos a montante, logo, tem-se:

$$\phi_w = \frac{1}{2}(3\phi_W - \phi_{WW}) \quad (3.38)$$

Esquema “*QUICK*” (*Quadratic Upwind Differencing*)

Este esquema é de terceira ordem de acuidade para os termos convectivos, sendo que utiliza dois pontos a montante e um a jusante.

$$\phi_w = \frac{5}{8}\phi_w + \frac{3}{8}\phi_P + \frac{1}{8}(\phi_w - \phi_{ww}) \quad (3.39)$$

Informações mais detalhadas sobre os esquemas de interpolação podem ser encontradas em THOMPSON e WILKES (1982).

Termo Difusivo

A integração do termo difusivo resulta em:

$$\int \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot \bar{n} dA = \sum_P^3 \left[ \frac{\Gamma_w A_{ww}}{\delta_w} (\phi_w - \phi_P) - \frac{\Gamma_e A_{ew}}{\delta_e} (\phi_P - \phi_w) \right] \quad (3.40)$$

Termo Fonte

A integral do termo fonte é expressa por:

$$\int S_\phi dV = S_u V + S_p V \phi_P \quad (3.41)$$

A linearização do termo fonte deve ser feita de tal sorte que o coeficiente  $S_p$  tenha um elevado valor negativo, para que se reduza a possibilidade da ocorrência de divergência numérica.

### 3.3.2. Acoplamento Pressão-Velocidade

Linearizadas as equações, deve-se determinar o campo de pressão ou uma expressão que o represente, o que é normalmente obtido pela manipulação algébrica das equações da continuidade de modo a acoplar o campo de pressões ao campo de velocidades. Este processo se chama correção de pressão, embora também corrija o campo de velocidades iterativamente na forma de predição e correção. Os campos de pressão que definem as velocidades nas interfaces devem satisfazer a conservação de massa. Os campos de pressão são obtidos de modo que a pressão absoluta seja atualizada de acordo com a equação da correção da pressão, definida por uma condição de contorno específica.

O acoplamento pressão-velocidade mais utilizado neste trabalho é o *SIMPLEC* (“Simple Consistent”), uma extensão do método *SIMPLE*, cuja formulação é amplamente detalhada em MALISKA (1995) e PATANKAR (1980). VAN DOORMAL e RAITHBY (1984) afirmam ser o *SIMPLEC* um algoritmo com ótimas condições de estabilidade.

### 3.3.3. Resolução do Sistema de Equações

A solução do sistema de equações no código CFX é iterativa, ou seja, é obtida por intermédio da minimização dos erros de aproximação. Vários métodos de iteração estão disponíveis no CFX, tais como o *stone*, *block stone*, *AMG*, *line solver*, entre outros, e a escolha é feita de acordo com as características de convergência do problema que se está tratando.

### 3.4. O Código CFX

Todo o procedimento numérico descrito é implementado com o auxílio do código computacional CFX versões 4.3 e 4.4, da AEA Technology, o qual consiste de um potente gerador de malhas e de um módulo de solução das equações de transporte, em que as soluções numéricas são obtidas pelo método dos volumes finitos. Sendo assim, pode-se dividir o código em três módulos:

- pré-processador;
- processador;
- pós-processador.

#### 3.4.1. Pré-Processador

O pré-processador presente nas versões 4.3 e 4.4 do código CFX é denominado “BUILD”. É um módulo interativo que permite a criação de malhas computacionais usando a técnica de multi-blocos, na qual um bloco é a unidade básica de construção das mais variadas geometrias e malhas numéricas. Cada bloco constitui um espaço hexaédrico formado por um conjunto de células inter-conectadas e orientadas por um sistema de coordenadas comum. Esses blocos geralmente são conectados de tal sorte que todas as áreas das células de interface de um bloco tenham as mesmas áreas correspondentes nas células do bloco adjacente.

Dentre as principais características da utilização deste pré-processador, destacam-se a fácil interface usuário - programa, permitindo-se a importação de geometrias de programas como o CAD e a possibilidade de geração de malhas complexas multi-blocos estruturadas e refinadas.

Entende-se como pré-processamento também a criação de um arquivo de comando no qual é prescrito o tipo de problema a ser solucionado, o sistema de coordenadas, as condições de contorno, os algoritmos de solução e seus parâmetros, além dos parâmetros dos modelos característicos do problema.

### 3.4.2. Processador

Conjugando-se a malha numérica com o arquivo de comando que descreve as condições de entrada e parâmetros de resolução, provenientes da etapa de pré-processamento, tem-se a simulação propriamente dita do escoamento. O módulo denominado “SOLVER” é o módulo de processamento do código CFX responsável pela discretização e resolução das equações diferenciais pelo método dos Volumes Finitos.

A cada interrupção do processamento, mesmo que não tenha sido satisfeito o critério de convergência, é gerado um arquivo com os resultados, o qual pode ser analisado na etapa de pós-processamento, bem como pode ser utilizado para o reinício do mesmo problema, até que se atinja o critério de convergência desejado, desde que seja utilizada a mesma malha numérica sem alterações de gradeamento.

### 3.4.3. Pós-Processador

A obtenção, interpretação e visualização dos resultados obtidos no código CFX são feitas pelo módulo de pós-processamento denominado “ANALYSE”. Sua interface gráfica é intuitiva e de fácil acesso e manuseio, permitindo a geração dos mais variados gráficos, tanto bidimensionais quanto tridimensionais, fornecendo importantes ferramentas para a visualização científica dos resultados numéricos.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS NUMÉRICOS DO ESCOAMENTO DO GÁS EM CICLONES

Neste capítulo, são apresentados os resultados numéricos das simulações efetuadas no código computacional CFX, versões 4.3 e 4.4, dividindo-se a apresentação entre os seis estudos de caso do escoamento somente do gás em ciclones abordados neste trabalho, incluindo as simulações referentes ao estudo experimental realizado.

Inicialmente, é mostrada a estratégia de solução adotada em todos os estudos de caso, e então parte-se para a apresentação dos estudos numéricos que são realizados no transcorrer deste trabalho, iniciando-se com a apresentação dos estudos de caso de ciclones com entrada tangencial: ciclone de YUU et al. (1978), ciclones de PATTERSON e MUNZ (1996) e ciclone CI-O2 da PETROBRAS/SIX, e posteriormente, os ciclones com entrada em voluta: CRISTEA et al. (1996), ciclone industrial I (típico da indústria de cimento) e ciclone industrial II (típico da indústria de petróleo).

#### 4.1. Estratégia de Solução

Em um primeiro estágio, as soluções numéricas são obtidas empregando-se o esquema de interpolação “upwind” (primeira ordem) para todas as variáveis em estado estacionário com o intuito de ser garantida a estabilidade da solução. Os modelos de turbulência testados nos primeiros trabalhos são o k- $\epsilon$  padrão (isotrópico) e o modelo dos tensores de Reynolds - DSM (“Differential Stress Model”), modelo anisotrópico.

Os resultados preliminares usando-se o esquema “upwind”, e portanto com alta difusão numérica (mecanismo de suavização dos gradientes nas soluções numéricas), conforme MALISKA (1995), são usados como condições iniciais quando é introduzido um esquema de interpolação de alta ordem apenas para os componentes de velocidade, efetuando-se então as simulações em estado transiente.

Esta estratégia de solução, empregada em nossos trabalhos, objetiva contornar problemas de convergência inerentes à utilização do DSM com esquemas de interpolação de alta ordem, alcançando-se o estado estacionário para todos os casos depois de aproximadamente 1 segundo de tempo real. Para todas as simulações é utilizada uma precisão de  $10^{-7}$  na norma euclidiana para o resíduo de massa.

Em suma, as estratégias de solução aplicadas neste trabalho são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Estratégias de Solução

	estado	modelo de turbulência	esquema de interpolação
1 <sup>o</sup> estágio	estacionário	k-ε	“upwind”
		DSM	
2 <sup>o</sup> estágio	transiente	k-ε	“higher upwind”
		DSM	“QUICK”

#### 4.2. Estudo de Caso 1 - YUU et al. (1978)

Os primeiros resultados obtidos no transcórrer deste trabalho são relativos ao ciclone utilizado no trabalho experimental de YUU et al. (1978), cujos autores utilizaram um ciclone de coluna cilíndrica ( $D_C = 0,296$  m) no qual são determinadas as distribuições do componente de velocidade tangencial em uma altura situada a 0,19 m do topo do ciclone (pouco abaixo do tubo de saída do gás, também denominado “vortex finder”) em três velocidades de entrada do ar distintas (9,8; 13,4 e 18,0 m/s). Para este caso, utilizou-se o código CFX versão 4.3. As condições operacionais são mostradas na Tabela 4.2, sendo que todas as simulações numéricas apresentadas nesta Tese são efetuadas considerando o escoamento à temperatura ambiente. Tem-se, portanto, que a massa específica e a viscosidade dinâmica do ar são as mesmas para todos os casos. A Tabela 4.3 apresenta as dimensões geométricas características do ciclone do Caso 1.

Tabela 4.2 - Condições Operacionais – Caso 1.

$v_o$ - velocidades de entrada do ar (m/s)	9,8; 13,4; 18,0
$\rho_g$ - massa específica do ar ( $\text{kg/m}^3$ )	1,08
$\mu_g$ - viscosidade dinâmica do ar (kg/ms)	$1,85 \cdot 10^{-5}$
z - altura (m) do topo do ciclone das medidas de velocidade	0,19

Tabela 4.3 - Dimensões características do ciclone de YUU et al. (1978).

$D_C$ (m)	$D_S$ (m)	$D_L$ (m)	$L_e$ (m)	$L_c$ (m)	$L_S$ (m)	$L_{CO}$ (m)
0,296	0,152	0,075	0,11	0,06	0,16	0,40

#### 4.2.1. Estudo dos Modelos de Turbulência, Esquemas de Interpolação e Refinamento da Malha 3-D

Como apresentado no Capítulo 3, modelos de turbulência isotrópicos e anisotrópicos podem ser empregados em estudos de CFD. Consequentemente, o primeiro objetivo é encontrar um modelo que representa com maior precisão o escoamento complexo do gás no interior ciclônico. Para tanto, os modelos k- $\epsilon$  padrão e DSM são testados.

Esquemas de interpolação de primeira e de alta ordem também são avaliados, a fim de se tentar evitar problemas de difusão numérica e de oscilações numéricas durante as simulações.

Ao se iniciarem as construções das malhas tridimensionais com o intuito de se simular o escoamento do gás em ciclones, é necessário saber a extensão da importância do refinamento da malha numérica. Para tanto, quatro malhas são construídas, por intermédio do pré processador “BUILD” presente no código CFX, sendo o número de células de cada malha descrito na Tabela 4.4.

Inicialmente, utiliza-se a Malha 1, pouco refinada e ilustrada na Figura 4.1, na qual o modelo de turbulência  $k-\epsilon$  é utilizado, assim como os esquemas de interpolação “upwind”, “higher upwind” e “QUICK”, para a obtenção de resultados preliminares de distribuição do componente de velocidade tangencial em um menor espaço de tempo. A Figura 4.2 apresenta os resultados obtidos para a velocidade de entrada do ar de 9,8 m/s, sendo que o eixo x representa a relação  $r/R_D$  - posição radial da medida adimensionalizada pelo raio do ciclone, em que o ponto 0 corresponde ao centro do equipamento e o ponto 1 à parede externa do ciclone.

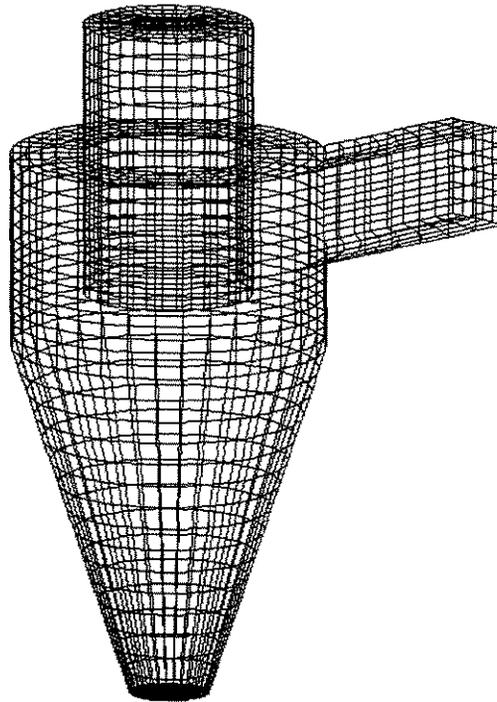


Figura 4.1 - Malha 3-D do ciclone – Caso 1.

Tabela 4.4 - Número de células das malhas.

Malha	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Número de células	12.500	18.900	51.000	71.100

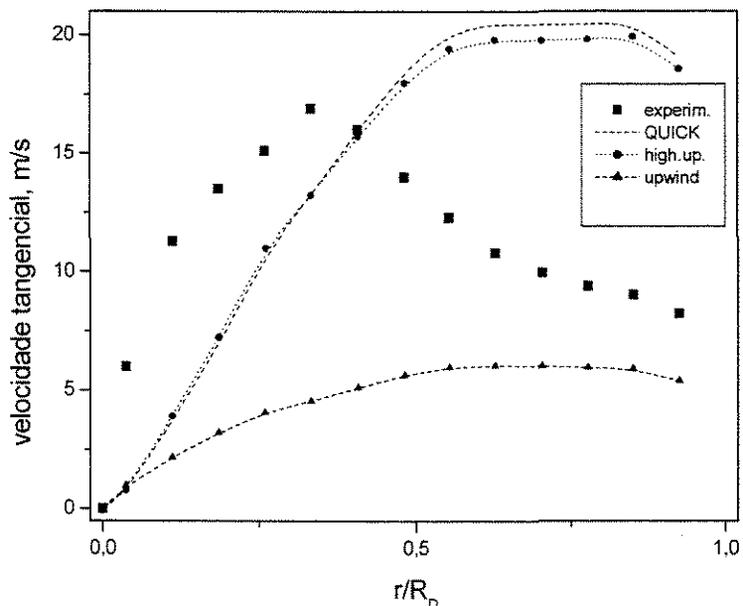


Figura 4.2 - Distribuições da velocidade tangencial para a Malha 1, utilizando-se o modelo  $k-\epsilon$  e  $v_0 = 9,8$  m/s.

Verifica-se, pela inspeção da Figura 4.2, que o modelo  $k-\epsilon$  não representa adequadamente o escoamento em ciclones, por se tratar de um modelo isotrópico, como já se tinha observado em trabalhos anteriores, como os de WITT et al., 1999 e MEIER et al., 2000. Salienta-se que o modelo RNG  $k-\epsilon$  também é testado e resultados semelhantes ao modelo  $k-\epsilon$  são obtidos. Com isto, em todas as simulações efetuadas posteriormente, trabalha-se apenas com o modelo de turbulência DSM, já que o mesmo se apresenta como o modelo mais adequado para a representação do escoamento giratório do gás em ciclones.

A Figura 4.3 apresenta os resultados numéricos obtidos com o modelo DSM e a malha 1, da qual constata-se que o esquema de interpolação de primeira ordem “upwind” não representa bem a distribuição de velocidades no interior ciclônico, já que a distribuição de velocidades com o pico de velocidade característica de ciclones não é obtida. Este comportamento, pode ser atribuído à difusão numérica (mecanismo de suavização dos gradientes nas soluções numéricas). Já para os esquemas de alta ordem, a representação é qualitativamente melhor, já que a difusão numérica é atenuada.

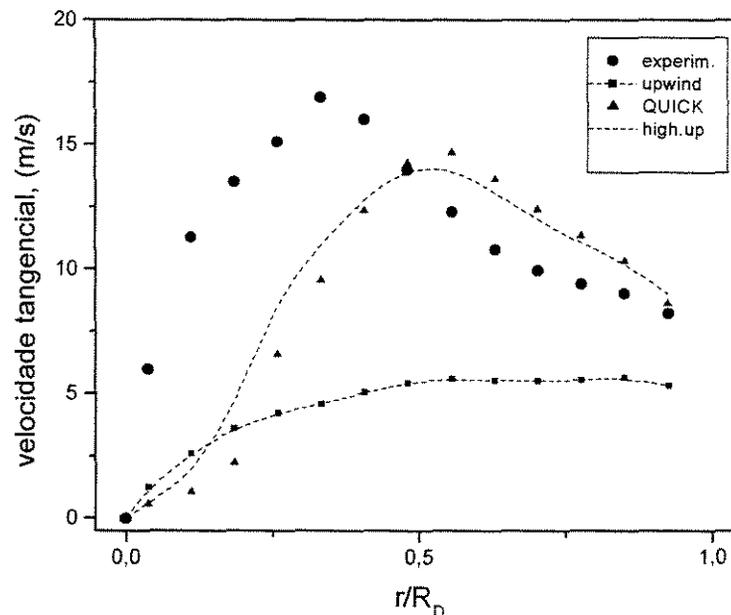


Figura 4.3 - Distribuições do componente de velocidade tangencial para a Malha 1, utilizando-se o DSM e  $v_0 = 9,8$  m/s.

Constatado que os esquemas de interpolação “higher upwind” e “QUICK” se mostram os mais adequados para o fechamento do modelo de turbulência empregado, parte-se para a comparação dos resultados obtidos em cada malha numérica. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam os resultados numéricos obtidos com os esquemas “higher upwind” e “QUICK”, comparando-se os resultados numéricos para as quatro malhas com os resultados obtidos experimentalmente.

Observa-se, pela inspeção da Figura 4.4, que a única diferença significativa nos resultados obtidos quando da utilização do esquema “higher upwind” é encontrada entre a malha 1 (12.500 células) e as demais. Já a Figura 4.5, com o esquema “QUICK”, mostra que somente as malhas 3 e 4 apresentam resultados bastante semelhantes, verificando-se que há deslocamento das curvas de distribuição de velocidade para todas as malhas estudadas.

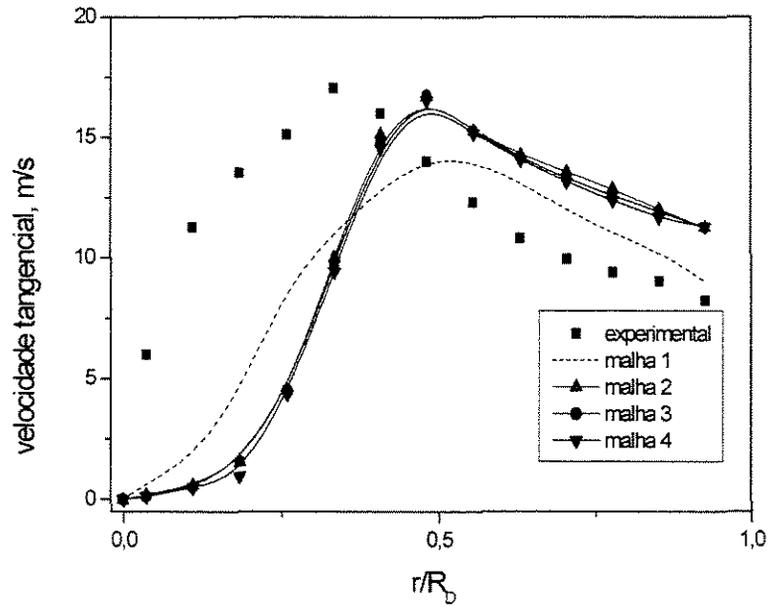


Figura 4.4 - Comparação entre as malhas numéricas utilizando o modelo DSM e esquema “higher upwind”.

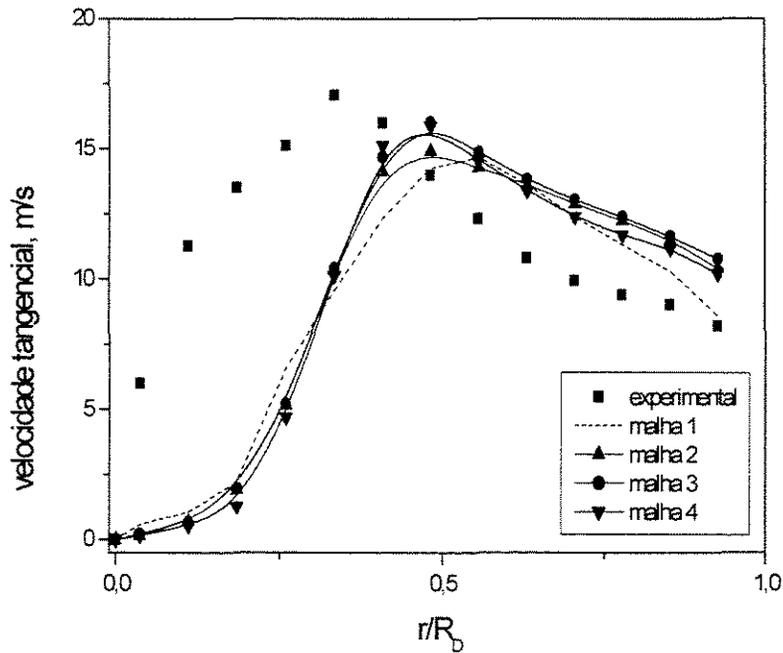


Figura 4.5 - Comparação entre as malhas numéricas utilizando o modelo DSM e esquema “QUICK”.

### 4.2.2. Comparação entre os esquemas de interpolação para as três velocidades de entrada do ar

Para as outras velocidades de entrada do ar ( $v_0 = 13,4$  e  $18,0$  m/s) encontradas no trabalho de YUU et al. (1978), optou-se pela malha 3 para serem feitas as simulações com o objetivo de se compararem os esquemas de interpolação. A escolha deve-se ao fato de que a malha 3 apresenta resultados bastante semelhantes aos da malha 4, com a vantagem de requerer menor tempo computacional devido ao menor número de células. As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 ilustram os resultados obtidos para as velocidades de  $9,8$ ,  $13,4$  e de  $18,0$  m/s, respectivamente.

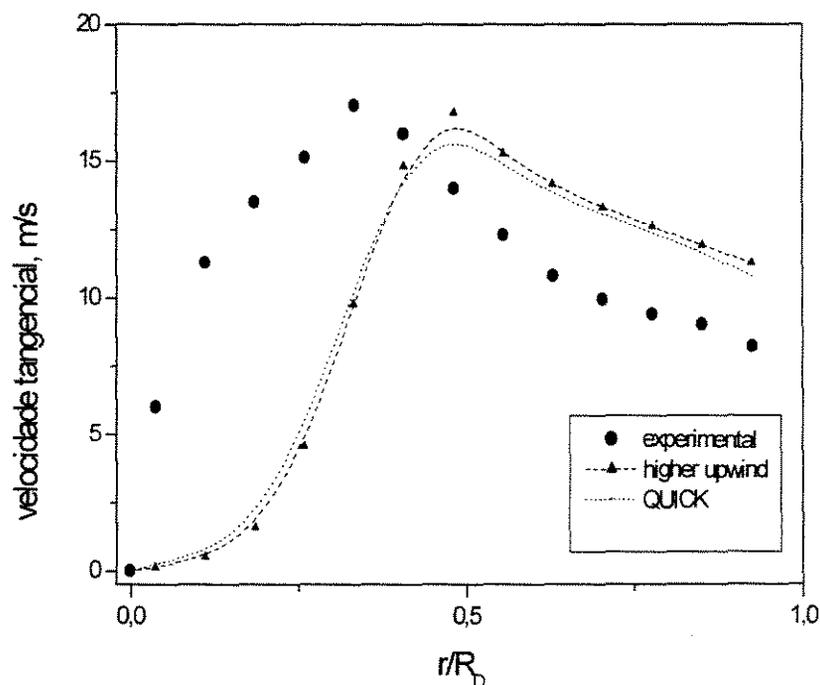


Figura 4.6 - Comparação entre os esquemas de interpolação “higher upwind” e “QUICK”,  $v_0 = 9,8$  m/s e modelo DSM.

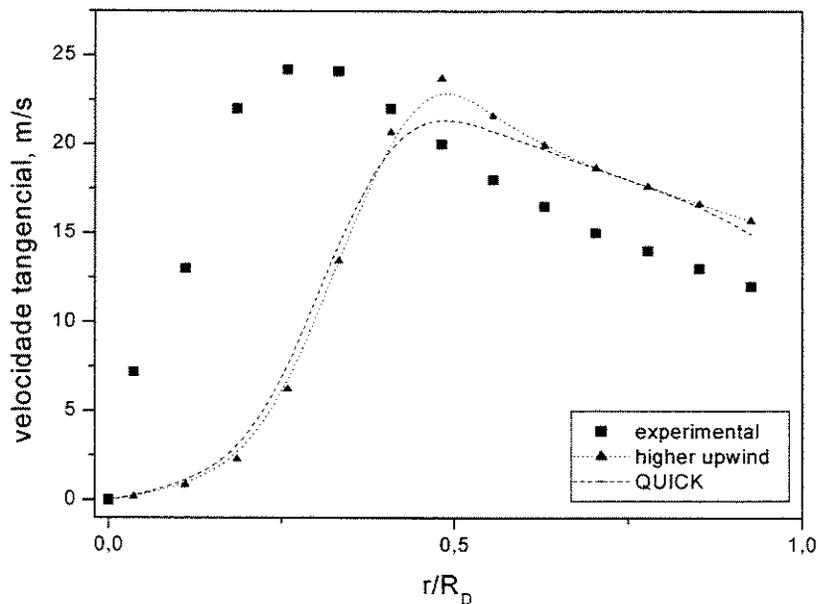


Figura 4.7 - Comparação entre os esquemas “higher upwind” e “QUICK”,  $v_0 = 13,4 \text{ m/s}$  e modelo DSM.

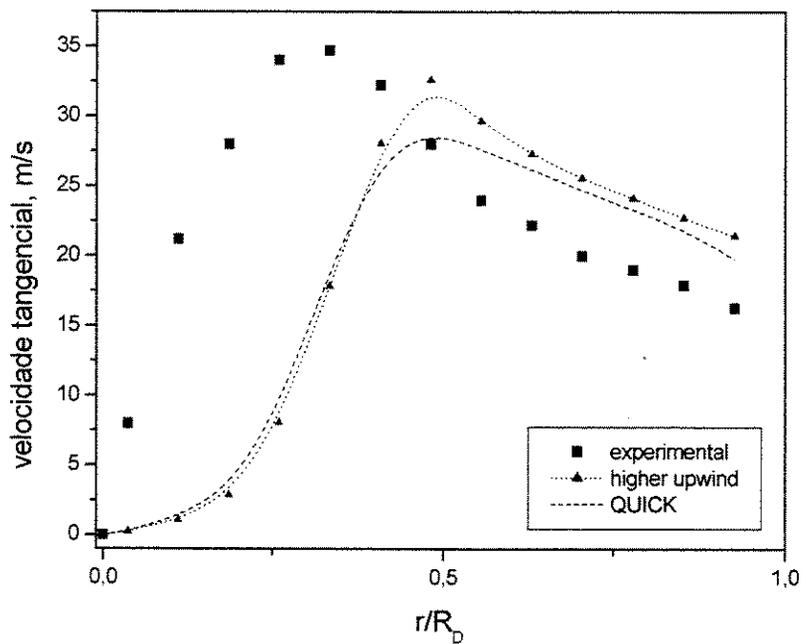


Figura 4.8 - Comparação entre os esquemas “higher upwind” e “QUICK”,  $v_0 = 18,0 \text{ m/s}$  e modelo DSM.

Constata-se, para as três velocidades de entrada do ar, que o esquema de interpolação “higher upwind” propicia picos de velocidade tangencial levemente superiores àqueles do esquema “QUICK” e que à medida que houve aumento da velocidade de entrada do ar, as diferenças entre os esquemas de interpolação são mais significativas.

Para melhor ilustrar quantitativamente os resultados numéricos obtidos, na Tabela 4.5 são apresentados os valores máximos do componente de velocidade tangencial para todas as simulações realizadas. Verifica-se, em todos os casos, que o esquema “higher upwind” é o que apresenta os maiores picos de velocidade tangencial, bastante próximos dos valores experimentais, quando comparados com os picos de velocidade tangencial quando utilizado o esquema “QUICK”.

Tabela 4.5 - Comparação entre os valores máximos da velocidade tangencial experimentais e simulados no CFX.

vel. tangencial	“high. upw.”	“QUICK”	“high. upw.”	“QUICK”	“high. upw.”	“QUICK”
máxima (m/s)	$v_0 = 9,8$ ( $v_{\max}$ exp.=17,0)		$v_0 = 13,4$ ( $v_{\max}$ exp.=24,2)		$v_0 = 18,0$ ( $v_{\max}$ exp.=34,8)	
Malha 1	14,1	14,7	-	-	-	-
Malha 2	16,7	14,9	-	-	-	-
Malha 3	16,8	16,0	23,7	21,7	32,6	29,0
Malha 4	16,6	15,9	-	-	-	-

Nota-se que à medida que se aumenta a velocidade de entrada do ar no equipamento, o desempenho do esquema “higher upwind” é superior ao do esquema “QUICK”, com a vantagem do “higher upwind” ser um esquema de menor ordem que o “QUICK”, apresentando assim menores problemas de convergência e estabilidade numérica.

Para melhor visualização dos fenômenos inerentes ao escoamento ciclônico, os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e pressão ao longo de todo o ciclone são apresentados nas Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 respectivamente, para as velocidades de entrada do ar de 9,8, 13,4 e 18,0 m/s, utilizando-se a malha 3 e com o esquema de interpolação “higher upwind”.

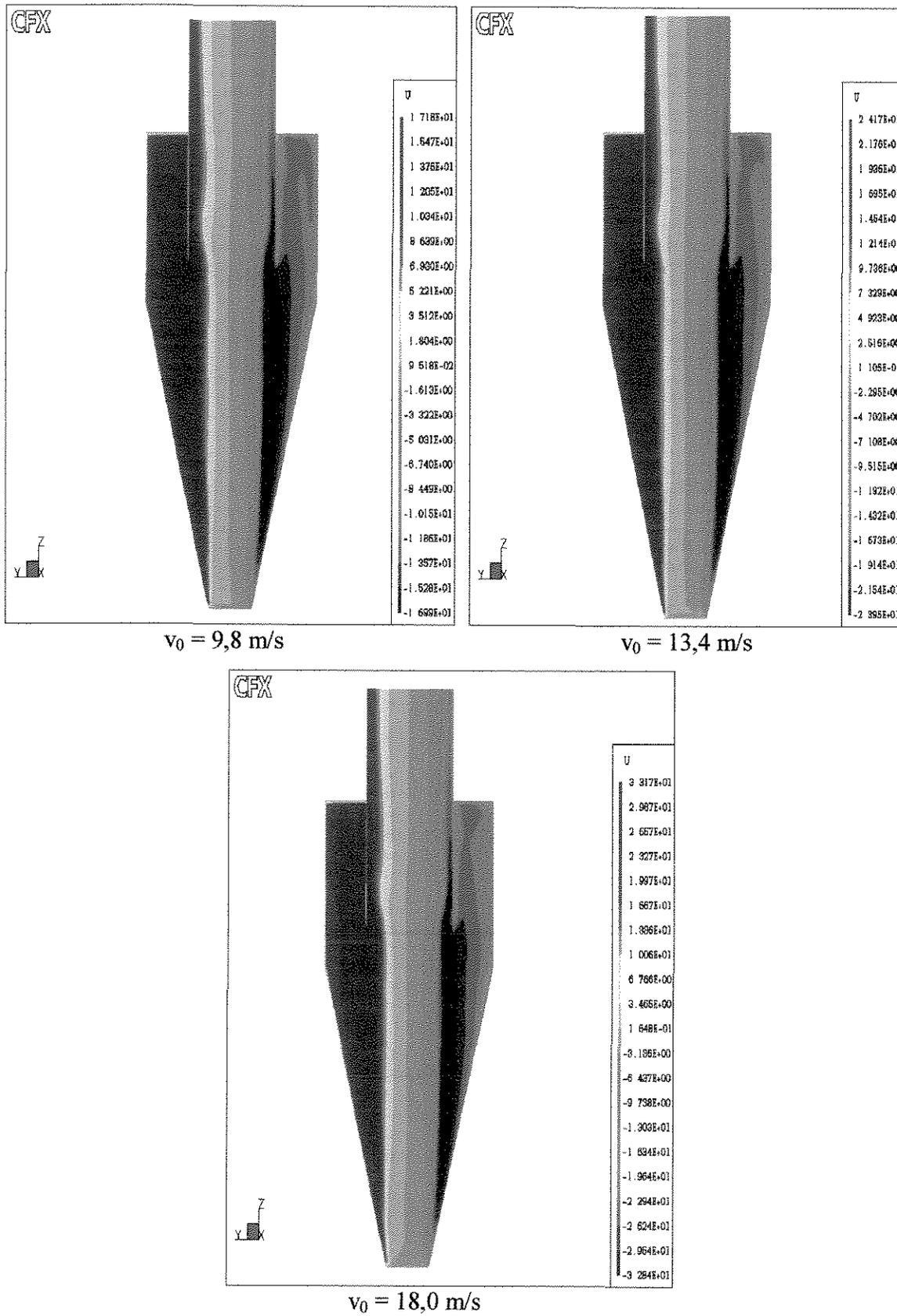


Figura 4.9. Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 1.

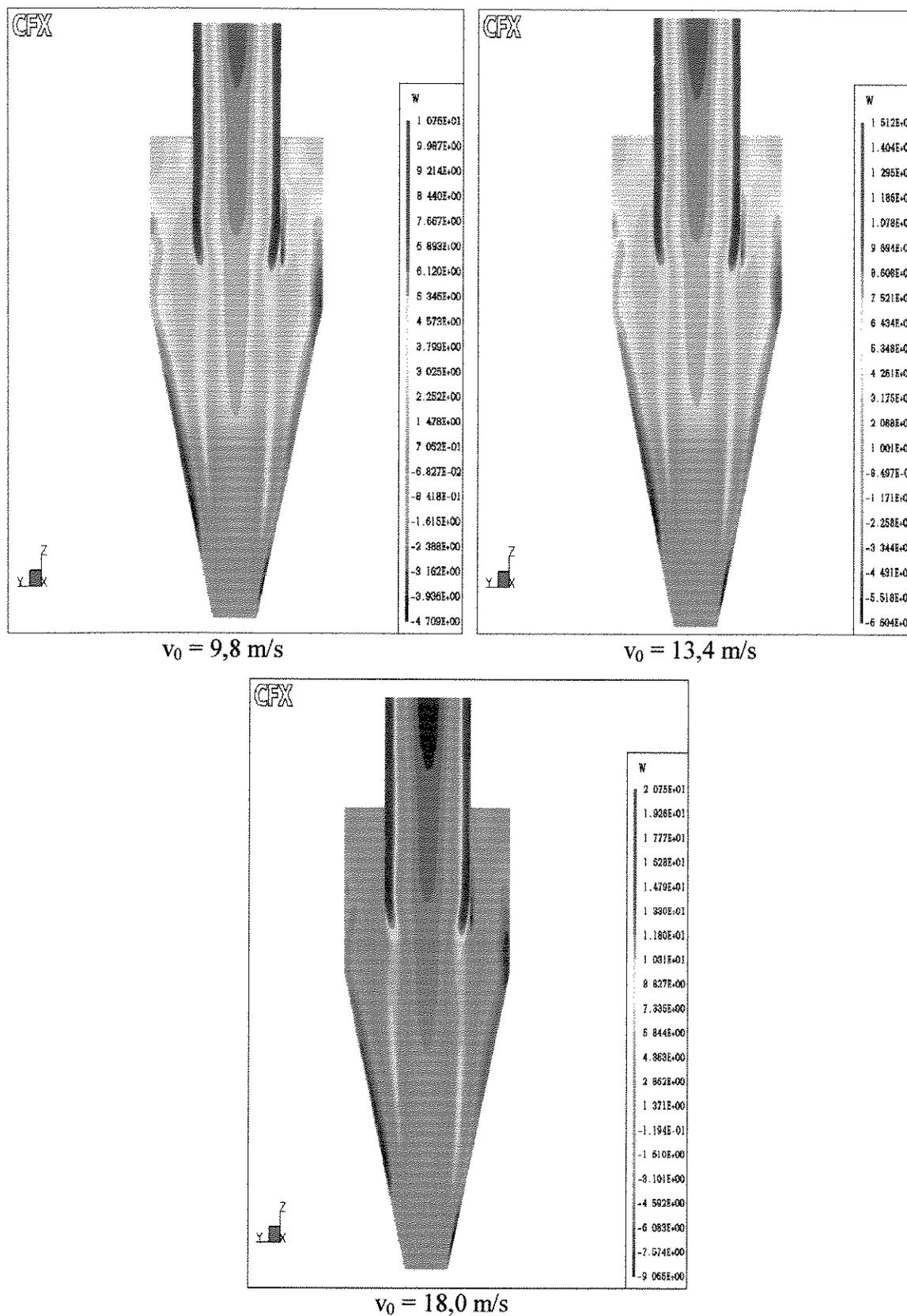


Figura 4.10. Mapeamentos dos campos de velocidade axial – Caso 1.

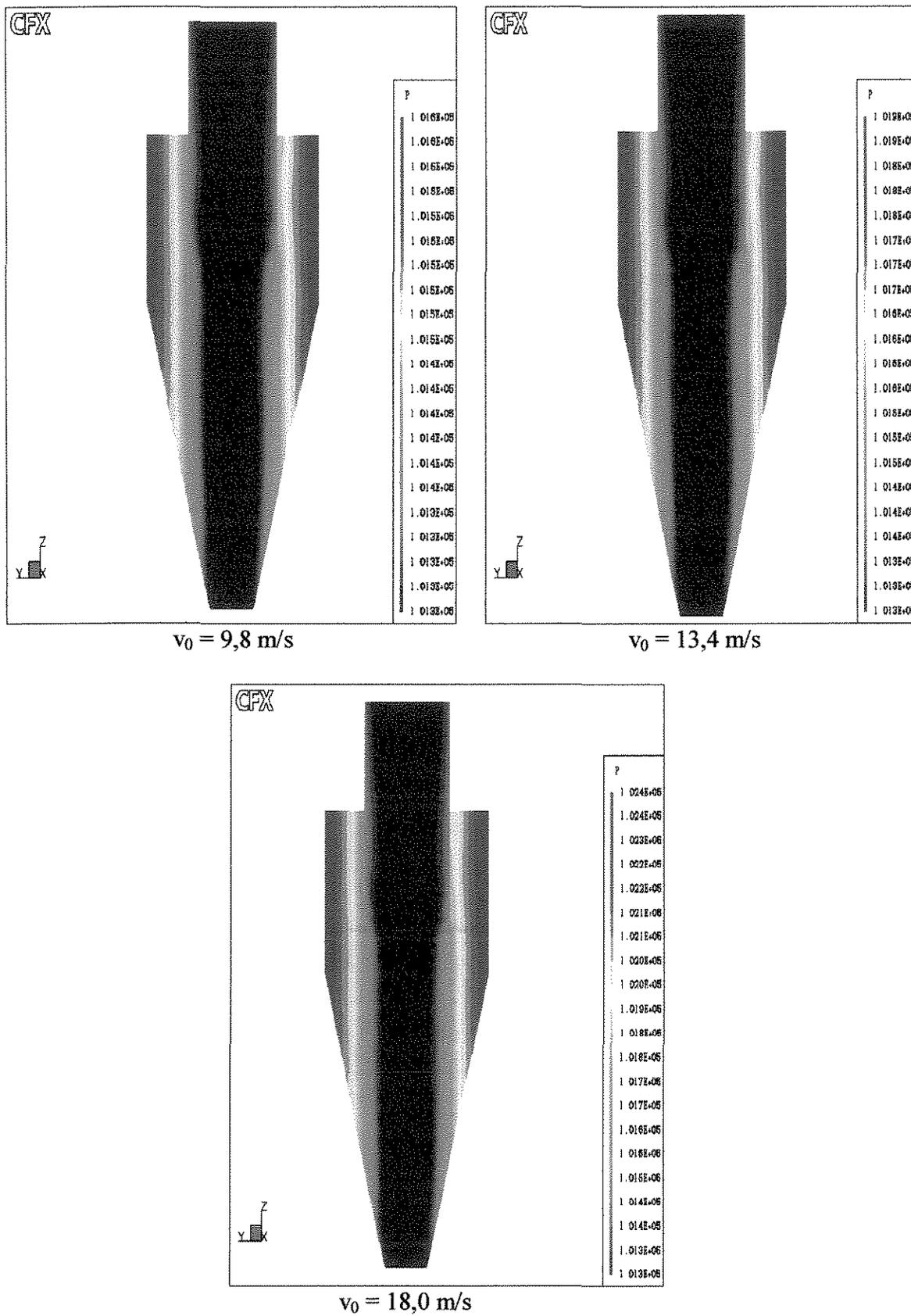


Figura 4.11. Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 1.

Observa-se, pela inspeção da Figura 4.9, que a preservação da alta velocidade de giro ao longo de praticamente todo o equipamento, quase o dobro da velocidade de entrada do ar, é bem caracterizada nas simulações. Este comportamento é verificado para as três velocidades de entrada do ar.

Os mapeamentos dos campos de velocidade axial mostrados na Figura 4.10 mostram que a reversão do fluxo de gás se estende por praticamente todo o equipamento (coloração verde nas figuras), justificada pelo fato do escoamento apresentar alta preservação da velocidade de giro.

A análise da Figura 4.11 indica que o escoamento neste ciclone é caracterizado por uma larga região de baixa pressão. MEIER (1998) creditou grande importância a essa região de baixa pressão, relacionando-a à região de alta vorticidade e à reversão do escoamento, observando que quanto menor a região de baixa pressão, mais rapidamente se tem a reversão do escoamento e menor a região de alta vorticidade.

Quanto à queda de pressão, os valores obtidos nas simulações são:  $\Delta P = 350$  Pa para a velocidade de entrada do ar de 9,8 m/s,  $\Delta P = 600$  Pa para a velocidade de entrada do ar de 13,4 m/s e  $\Delta P = 1100$  Pa para a velocidade de entrada do ar de 18,0 m/s.

Em contrapartida à boa representação de todos os fenômenos inerentes ao escoamento ciclônico, observa-se que ocorre deslocamento das curvas de distribuição de velocidade tangencial em direção à parede do ciclone, para todas as quatro malhas estudadas. Este comportamento pode ser decorrente de se ter assumido nos experimentos numéricos que o ciclone opera em um circuito aberto, a fim de se tornar plausível a obtenção de soluções em tempo hábil, enquanto que o trabalho experimental foi realizado em um circuito fechado, como abordado em MEIER et al. (2000). Várias tentativas de solucionar esse problema de deslocamento dos picos de velocidade tangencial foram realizadas sem sucesso, mas as informações retiradas deste caso validam o estudo.

O estudo de caso 1 permite o estabelecimento da estratégia de solução que é adotada em todos os outros ciclones estudados no transcórre deste trabalho e que é esquematizada na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Estratégia de Solução

	estado	modelo de turbulência	esquema de interpolação
1 <sup>o</sup> estágio	estacionário	DSM	“upwind”
2 <sup>o</sup> estágio	transiente	DSM	“higher upwind”

Observa-se também do estudo do caso 1 que o refinamento da malha numérica em princípio contribuiu para sensível melhora dos resultados numéricos quando se compara uma malha de 12.500 células com uma de 71.100 células, entretanto, verifica-se que a malha 3 (51.000 células) já se mostra adequadamente refinada. Um maior refinamento desta malha em nada melhora o desempenho das simulações, tornando-se injustificável a utilização de uma malha extremamente refinada (malha 4) em virtude do tempo computacional requerido para a obtenção dos resultados ter uma relação direta com o número de células da malha.

Os resultados referentes a este estudo de caso foram publicados nos seguintes trabalhos: PERES et al. (2001) e MEIER et al. (2000).

### 4.3. Estudo de Caso 2 – PATTERSON e MUNZ (1996)

Dois estudos experimentais desenvolvidos por PATTERSON e MUNZ são abordados neste trabalho. Primeiramente, enfocam-se as simulações do escoamento do gás encontradas no trabalho de PATTERSON e MUNZ (1996), para depois realizarem-se as simulações do escoamento gás-particulados encontradas no trabalho de PATTERSON e MUNZ (1989), a ser discutido no Capítulo 5. Deve ser salientado que deste caso em diante, o código CFX versão 4.4 é o utilizado.

#### 4.3.1. Simulações do Escoamento do Gás

O estudo de caso utilizado é o trabalho experimental de PATTERSON e MUNZ (1996), o qual é conduzido em ciclones com seção cilíndrica de 0,102 m de diâmetro e quatro variações geométricas relacionadas ora ao diâmetro ora à altura de imersão do tubo de saída do gás, como mostrado nas Tabelas 4.7 e 4.8, que apresentam as dimensões geométricas dos ciclones.

Tabela 4.7 - Dimensões características dos ciclones do Caso 2.

$D_C$ (m)	0,102
$D_S$ (m)	0,0254; 0,0508
$D_L$ (m)	0,0254
$L_C$ (m)	0,1522
$L_e$ (m)	0,0508
$L_S$ (m)	0,070; 0,108
$L_{CO}$ (m)	0,203

Tabela 4.8 – Dimensões das quatro configurações geométricas.

Geometria	$D_S$ (m)	$L_S$ (m)
1	0,0508	0,108
2	0,0254	0,108
3	0,0508	0,07
4	0,0254	0,07

A montagem utilizada pelos autores era dotada de uma sonda tipo Pitot, com cinco furos perto de sua extremidade, para as medidas da pressão total e estática, as quais propiciaram a obtenção das medidas de distribuição radial dos componentes de velocidades, situada em uma altura a 0,13 m do topo do ciclone. O estudo contemplou três vazões distintas de alimentação de ar, ou seja, três velocidades de entrada do ar, sendo 2,75, 7,75 e 15,2 m/s. As quatro malhas foram construídas no pré processador “BUILD” presente no código e têm em média 48.000 células, representadas pela malha da geometria 1 mostrada na Figura 4.12.

Avaliam-se as distribuições dos componentes de velocidade tangencial e axial obtidas numericamente nas simulações, tendo-se como parâmetro os resultados obtidos experimentalmente por PATTERSON e MUNZ (1996). Em todas as simulações efetuadas, trabalha-se com o modelo de turbulência DSM.

As Figuras entre 4.13 e 4.22 apresentam as distribuições de velocidades sendo os eixos adimensionalizados em relação à velocidade de entrada do ar (eixo y) e ao raio da coluna cilíndrica do ciclone (eixo x), exceções feitas às Figuras 4.13 e 4.17, em que a velocidade não é adimensionalizada, para melhor visualização dos resultados.

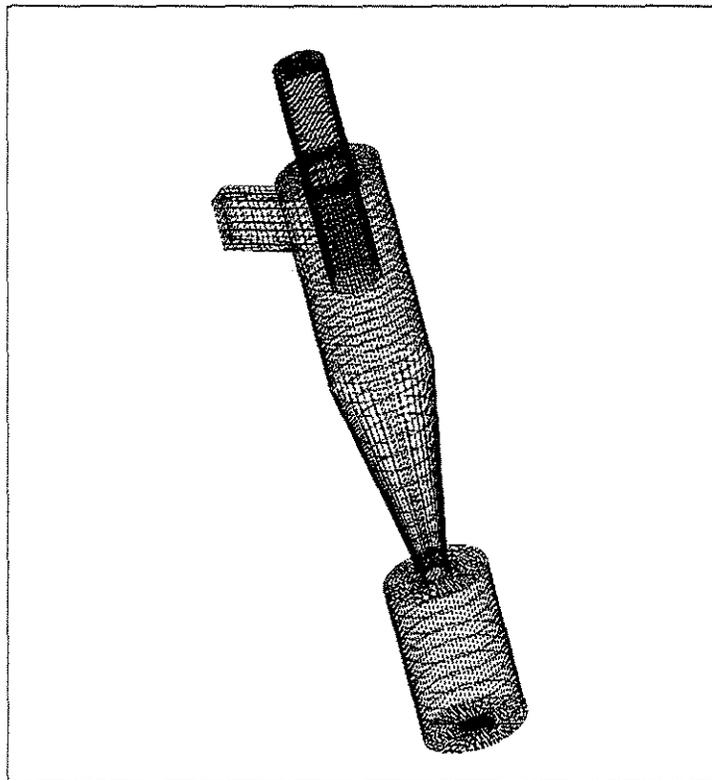


Figura 4.12 – Malha 3-D do ciclone – Caso 2.

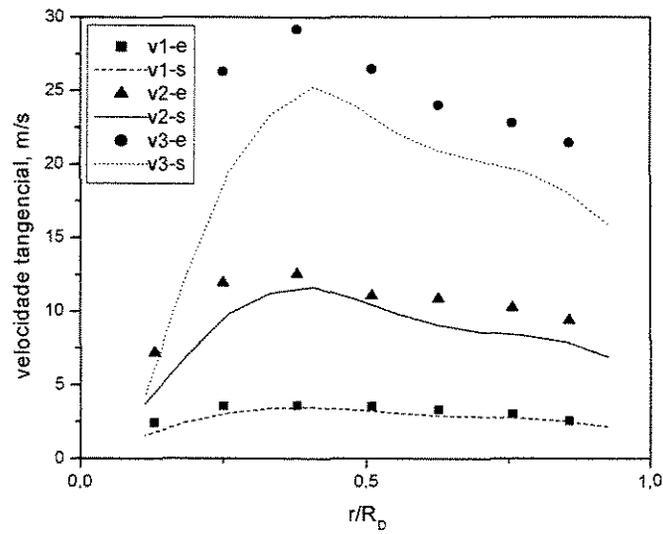


Figura 4.13 - Geometria 1: Distribuições do componente de velocidade tangencial.

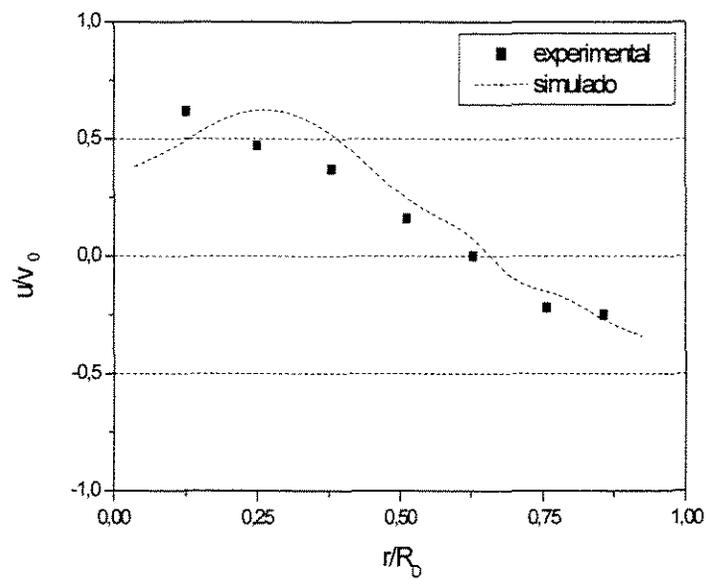


Figura 4.14 - Geometria 1: Distribuições da velocidade axial para  $v_0 = 2,75\text{m/s}$ .

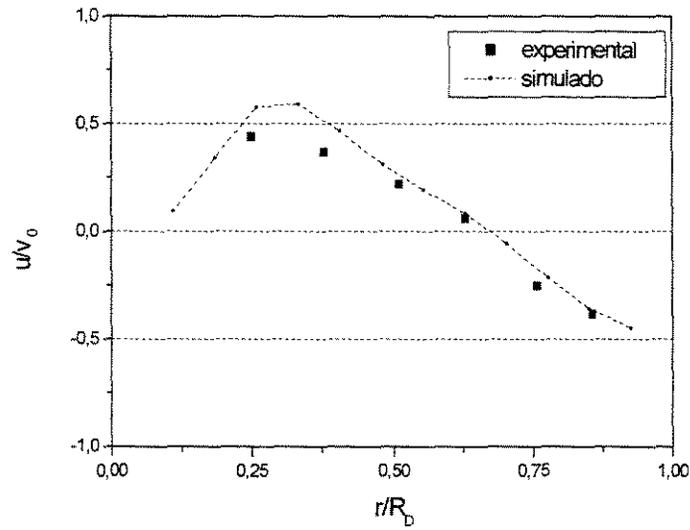


Figura 4.15 - Geometria 1: Distribuições da velocidade axial para  $v_0 = 7,75 \text{ m/s}$ .

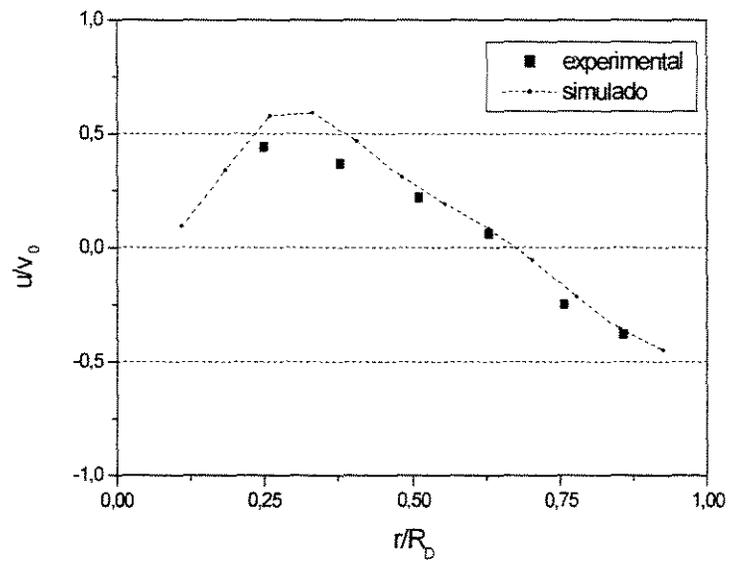


Figura 4.16 - Geometria 1: Distribuições da velocidade axial para  $v_0 = 15,2 \text{ m/s}$ .

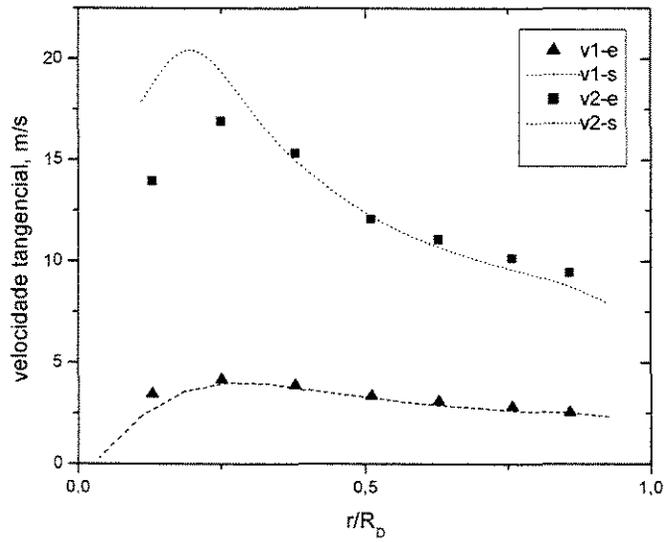


Figura 4.17 - Geometria 2: Distribuições do componente de velocidade tangencial.

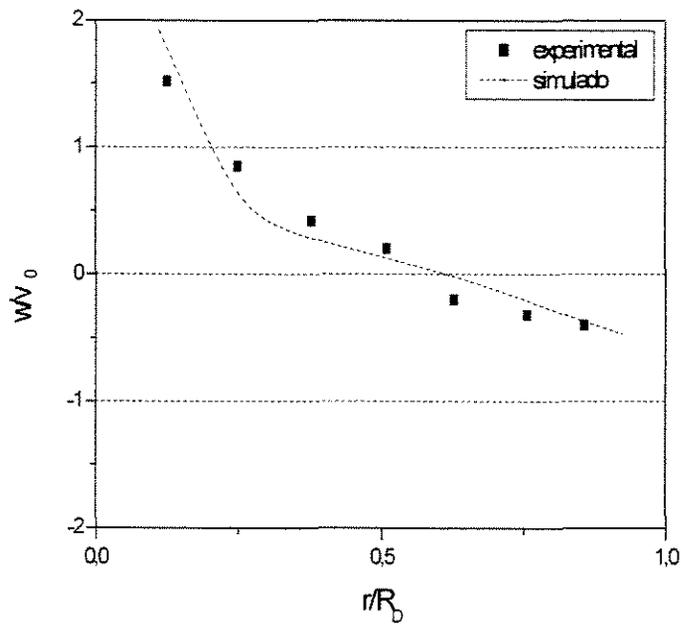


Figura 4.18 - Geometria 2: Distribuições da velocidade axial para  $v_0 = 7,75\text{m/s}$ .

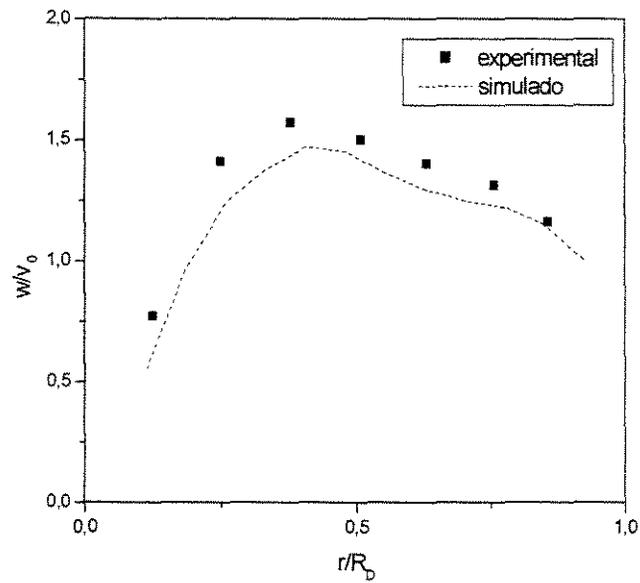


Figura 4.19 - Geometria 3: Distribuição do componente de velocidade tangencial para  $v_0 = 7,75\text{m/s}$ .

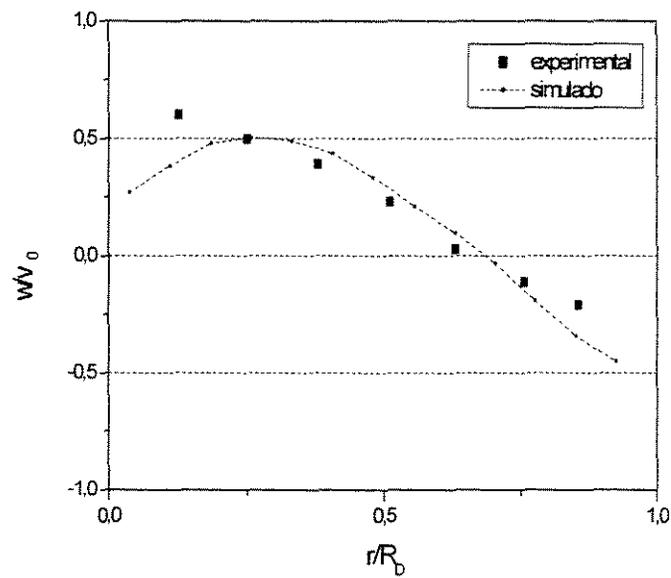


Figura 4.20 - Geometria 3: Distribuição do componente de velocidade axial para  $v_0 = 7,75\text{m/s}$ .

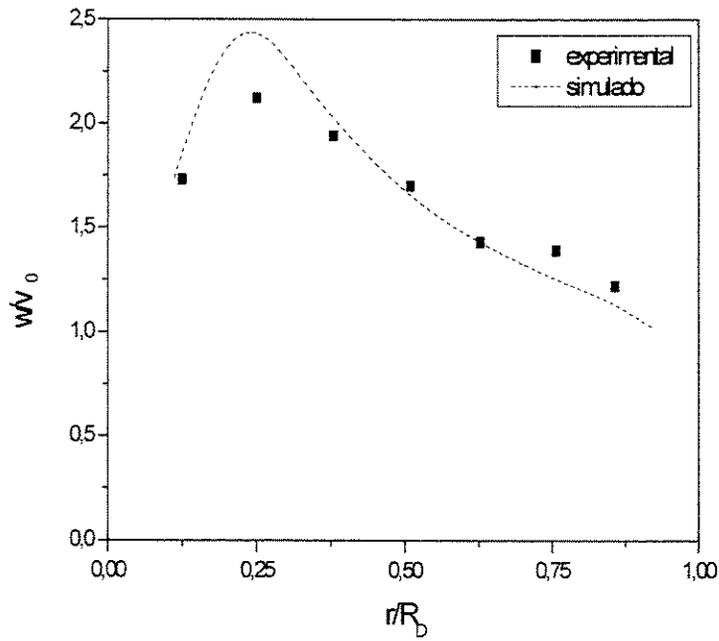


Figura 4.21 - Geometria 4: Distribuição do componente de velocidade tangencial para  $v_0 = 7,75 \text{ m/s}$ .

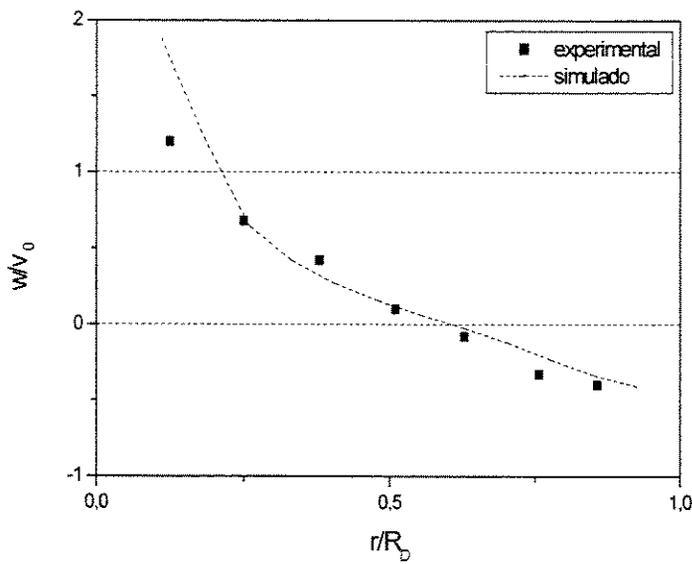


Figura 4.22 - Geometria 4: Distribuição do componente de velocidade axial para  $v_0 = 7,75 \text{ m/s}$ .

Observa-se, em todas as figuras em que foram confrontadas as distribuições de velocidade obtidas experimentalmente e as soluções numéricas, a capacidade do modelo de turbulência empregado (DSM), em conjunto com um esquema de interpolação de alta ordem (no caso, o esquema “higher upwind”), representar adequadamente as distribuições dos componentes de velocidade tangencial e axial do gás no interior do ciclone.

Verifica-se que as maiores divergências entre os dados experimentais e os simulados são encontradas nas simulações efetuadas com as malhas correspondentes às configurações geométricas 2 e 4, as quais têm o menor diâmetro do tubo de saída do gás ( $D_S = 0,0254$  m), constatando-se, em ambos os casos, que as velocidades tangenciais são superestimadas nas simulações. Pode-se afirmar também que à medida que se aumenta a velocidade de entrada do ar, há maior distanciamento entre os resultados numéricos e experimentais, embora qualitativamente tenham sido obtidas boas representações do escoamento no interior ciclônico.

No tocante ao tempo computacional requerido para a obtenção das soluções numéricas, nota-se que o tempo ainda é relativamente alto, sendo necessárias, em média, 80 horas de CPU para que a convergência seja alcançada.

As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam os mapeamentos dos campos dos componentes de velocidade tangencial e axial e dos campos de pressão, para a velocidade de entrada do ar de 7,75 m/s, com o intuito de serem comparados os efeitos das mudanças nas dimensões do diâmetro e altura de imersão do tubo de saída do gás no escoamento do gás ao longo de todo o ciclone.

Em uma primeira análise, fica evidente a similaridade tanto dos campos de velocidade quanto os de pressão entre as Geometrias 1 e 3 (ciclones com mesmo diâmetro do tubo de saída do gás -  $D_S = 0,0508$  m e que diferem apenas na altura de imersão do tubo de saída do gás, como mostrado na Tabela 4.8) bem como os resultados são semelhantes para as Geometrias 2 e 4 (ciclones que têm o mesmo diâmetro do tubo de saída do gás, ou seja,  $D_S = 0,0254$  m, metade do diâmetro das Geometrias 1 e 3 e diferem entre si apenas na altura de imersão do tubo de saída do gás).

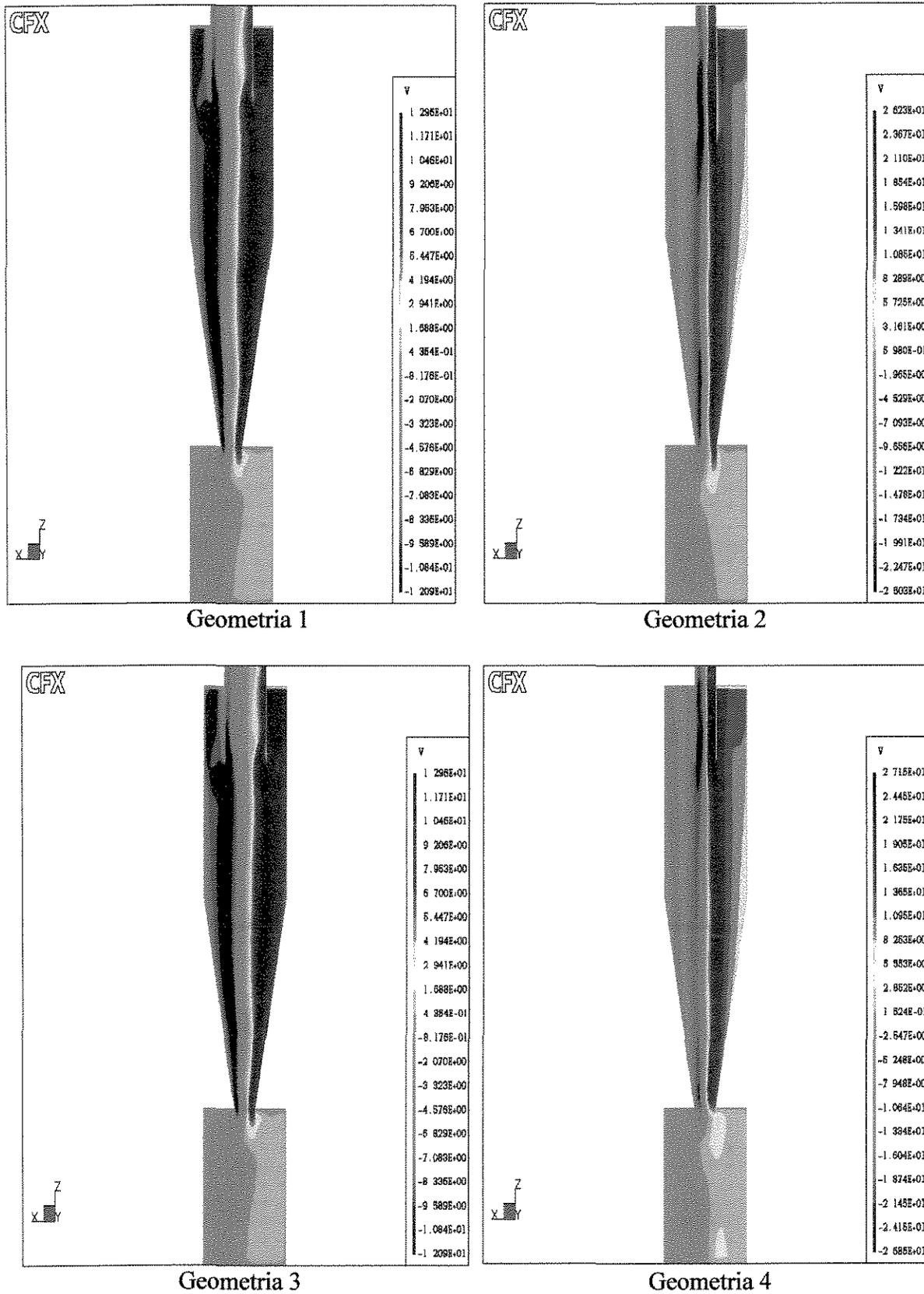


Figura 4.23 - Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 2.

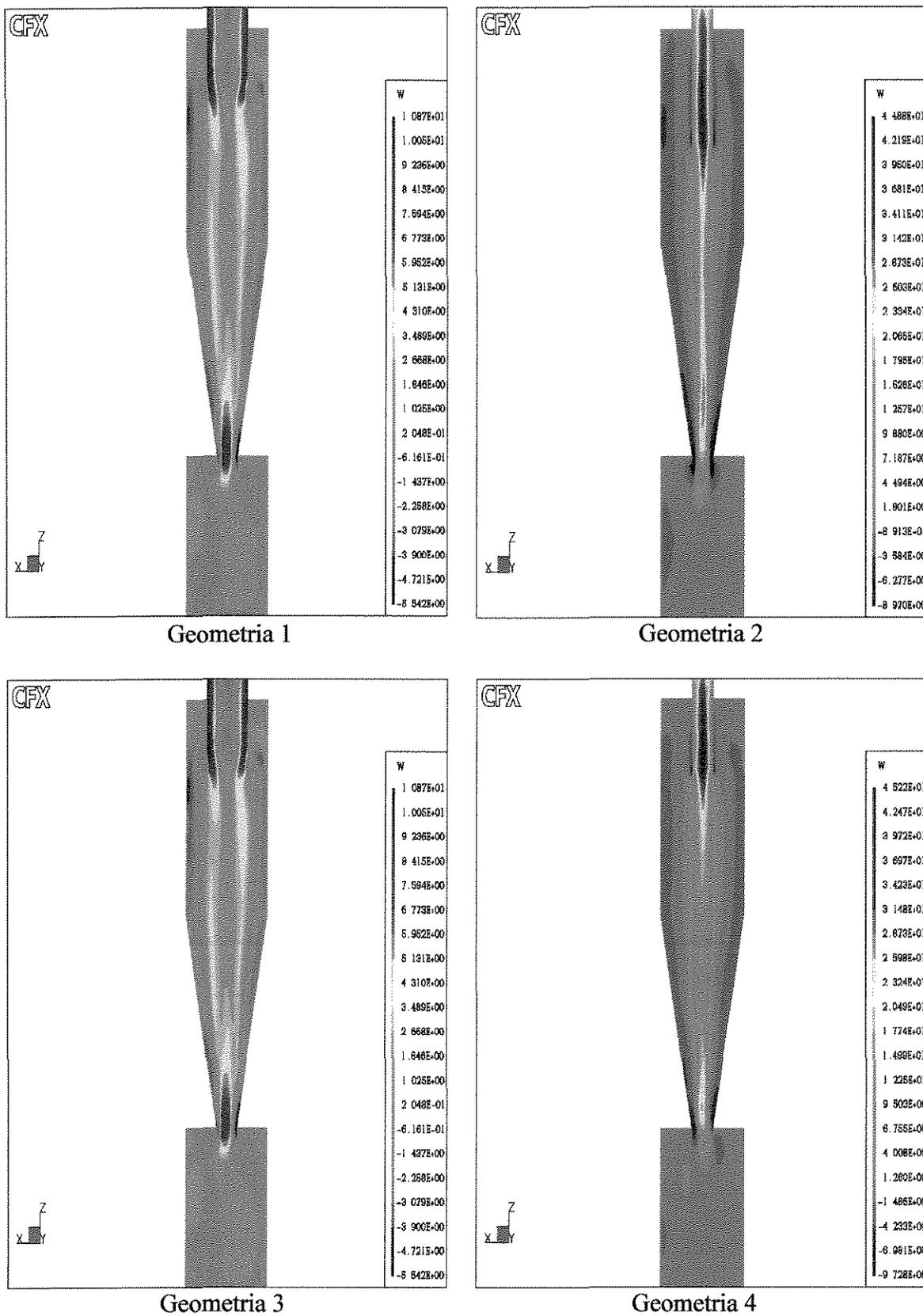


Figura 4.24 - Mapeamentos dos campos de velocidade axial – Caso 2.

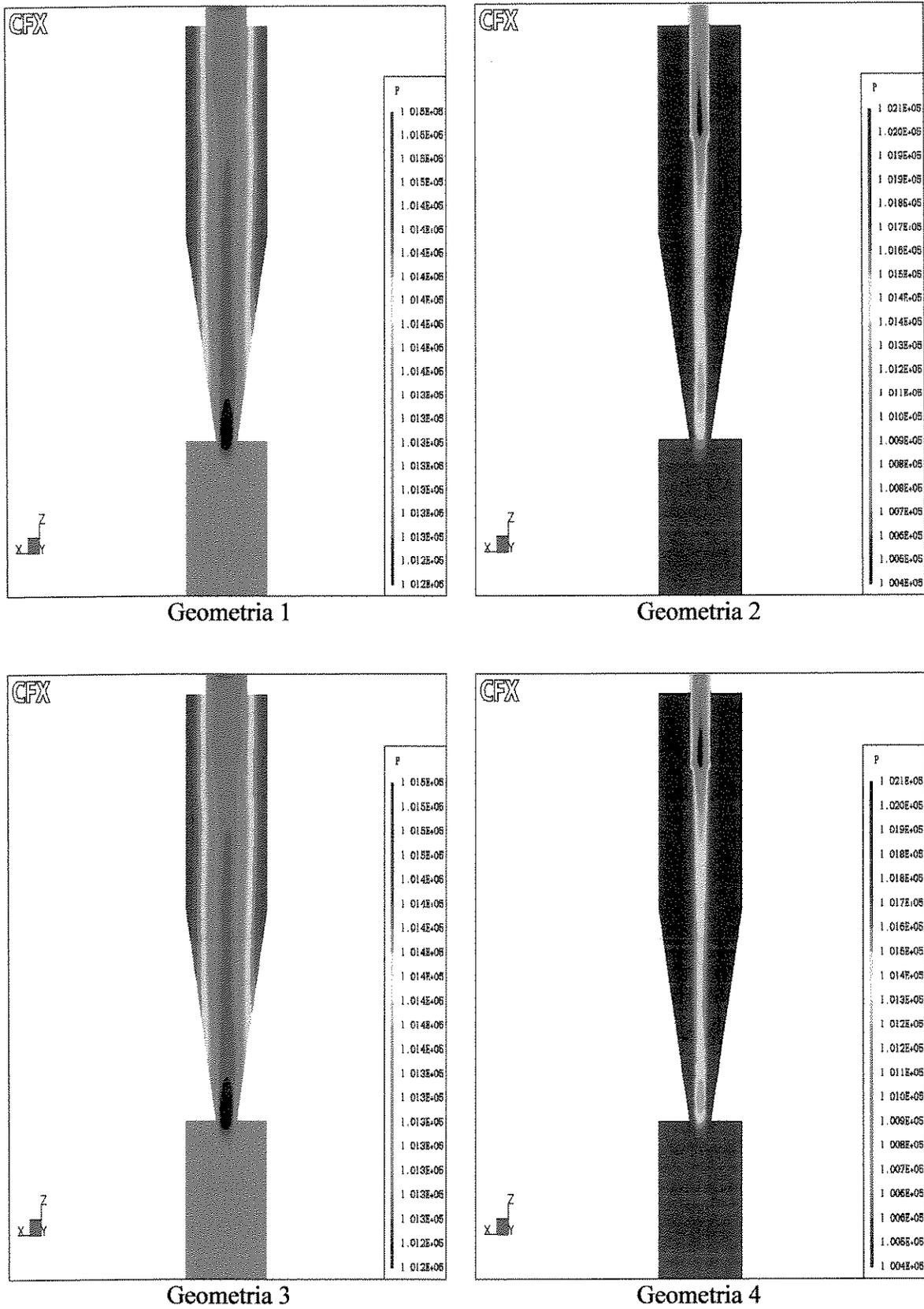


Figura 4.25 - Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 2.

Pela inspeção da Figura 4.23, algumas informações importantes podem ser obtidas:

- o fenômeno de preservação da alta vorticidade do escoamento é reproduzido nas simulações, sendo que a região de alta velocidade de giro é encontrada ao longo de todo o equipamento;
- em virtude do fenômeno de preservação do vórtice, a reversão do escoamento ocorre na região próxima à entrada do coletor de sólidos acoplado ao ciclone;
- não se observa simetria axial entre os campos de velocidade tangencial em nenhuma das configurações geométricas avaliadas;
- para as configurações 1 e 3, a alta velocidade de giro ao longo de todo equipamento é muito próxima do dobro da velocidade de entrada do ar enquanto que para as geometrias 2 e 4, a velocidade de giro é quase o triplo da velocidade de entrada do ar;
- a região de alta velocidade de giro encontrada nas configurações 1 e 3 é mais larga que a observada nas geometrias 2 e 4;
- para as configurações 1 e 3 ( $D_S = 0,0508$  m), a velocidade tangencial do gás no interior do tubo de saída do gás é próxima ao dobro da velocidade de entrada do ar, enquanto que para as configurações 2 e 4 ( $D_S = 0,0254$  m), é quase quatro vezes maior que a velocidade de entrada do ar, evidenciando a influência do diâmetro do tubo de saída do gás no escoamento do gás no ciclone.

Da análise da Figura 4.24, nota-se que novamente comportamentos distintos entre as configurações 1 e 3 e as configurações 2 e 4 são observados, a velocidade axial na região interna do tubo de saída do gás atinge valores quatro vezes maiores nos ciclones 2 e 4 quando comparada com a mesma região nos ciclones 1 e 3, resultado do efeito da diminuição do diâmetro do tubo de saída do gás.

Pela Figura 4.25, na qual é mostrado o mapeamento dos campos de pressão, observa-se, para as geometrias 1 e 3, uma região de baixa pressão que se estende por todo o ciclone, situando-se próxima ao eixo de simetria do equipamento, sendo que para as geometrias 2 e 4, a região de baixa pressão se situa no interior do tubo de saída do gás, justamente na região onde os componentes de velocidade axial e tangencial atingem o seu máximo.

Pode-se afirmar que para as configurações geométricas 2 e 4, as quais apresentam uma menor região de baixa pressão, a reversão do escoamento se dá mais rapidamente e a região de alta velocidade de giro é menor que as das configurações 1 e 3. Este comportamento pode explicar o fato dos valores dos picos de velocidade tangencial e axial para as configurações 2 e 4 serem muito superiores aos observados para as configurações 1 e 3.

Quanto à queda de pressão total nos ciclones, observa-se que a queda de pressão é bem maior para as configurações geométricas 2 e 4, na ordem de 2300 Pa, enquanto para as configurações geométricas 1 e 3 a queda de pressão situa-se na faixa de 350 Pa. Dados experimentais de queda de pressão para o escoamento do gás não são apresentados pelos autores, não sendo portanto possível a validação dos mesmos.

Os resultados referentes a este estudo de caso foram publicados no trabalho de PERES et al. (2002b).

#### **4.4. Estudo de Caso 3 – Ciclone CI-02 PETROBRAS/SIX**

Neste tópico, os resultados obtidos são referentes às simulações numéricas do estudo experimental desenvolvido no transcorrer deste trabalho.

##### **4.4.1. Apresentação dos Resultados Experimentais**

Os resultados experimentais das distribuições de velocidade tangencial obtidos neste trabalho foram coletados no ciclone CI-02, o qual faz parte de uma planta semi-piloto instalada na unidade de ciclones a frio da PETROBRAS-SIX (Superintendência de Industrialização do Xisto) localizada na cidade de São Mateus do Sul - PR.

##### **4.4.1.a. Montagem Experimental**

A unidade de ciclones a frio onde foi instalada a montagem experimental utilizada nesse trabalho é mostrada na Figura 4.26.

O ciclone utilizado para os experimentos de medição de distribuição de velocidades foi um ciclone em acrílico, conhecido como CI-02, com entrada tangencial e altura aproximada de 1,80m. Para a obtenção do mapeamento dos campos de velocidade tangencial ao longo de todo o ciclone, foram feitos pontos de inserção da sonda tipo Pitot em cinco alturas (dois na seção cilíndrica e três na seção cônica do equipamento). As Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam detalhes do ciclone e da sonda que foi acoplada ao mesmo, enquanto a Figura 4.30 mostra uma esquematização do equipamento, cujas dimensões se encontram na Tabela 4.9.

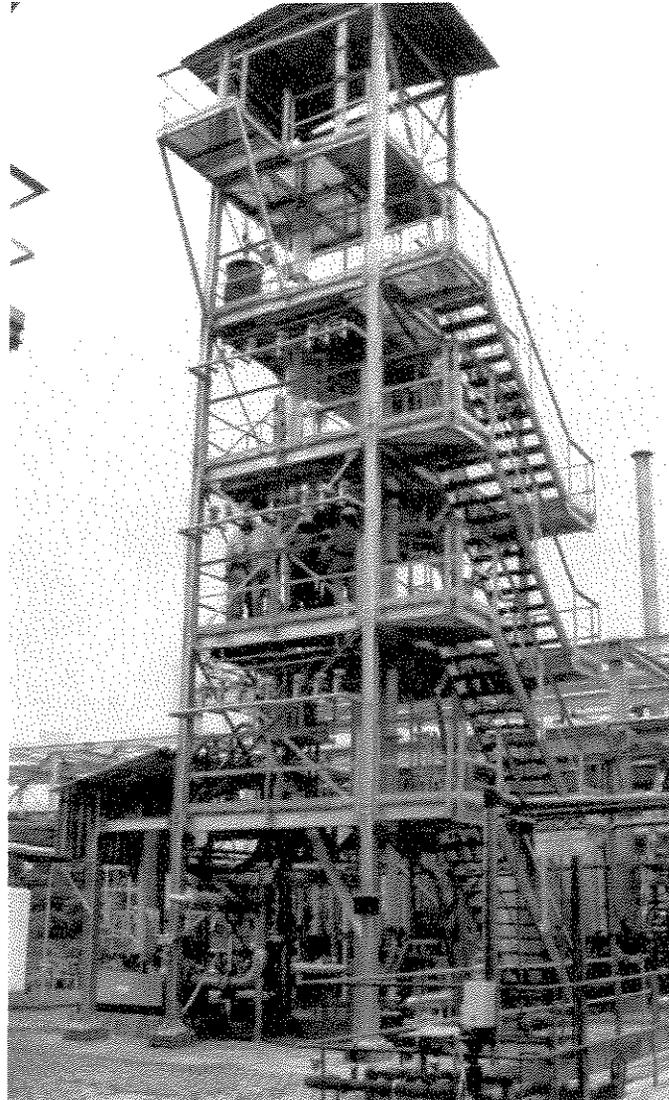


Figura 4.26 – Detalhe Fotográfico da unidade de ciclones a frio da Petrobras-SIX em São Mateus do Sul.

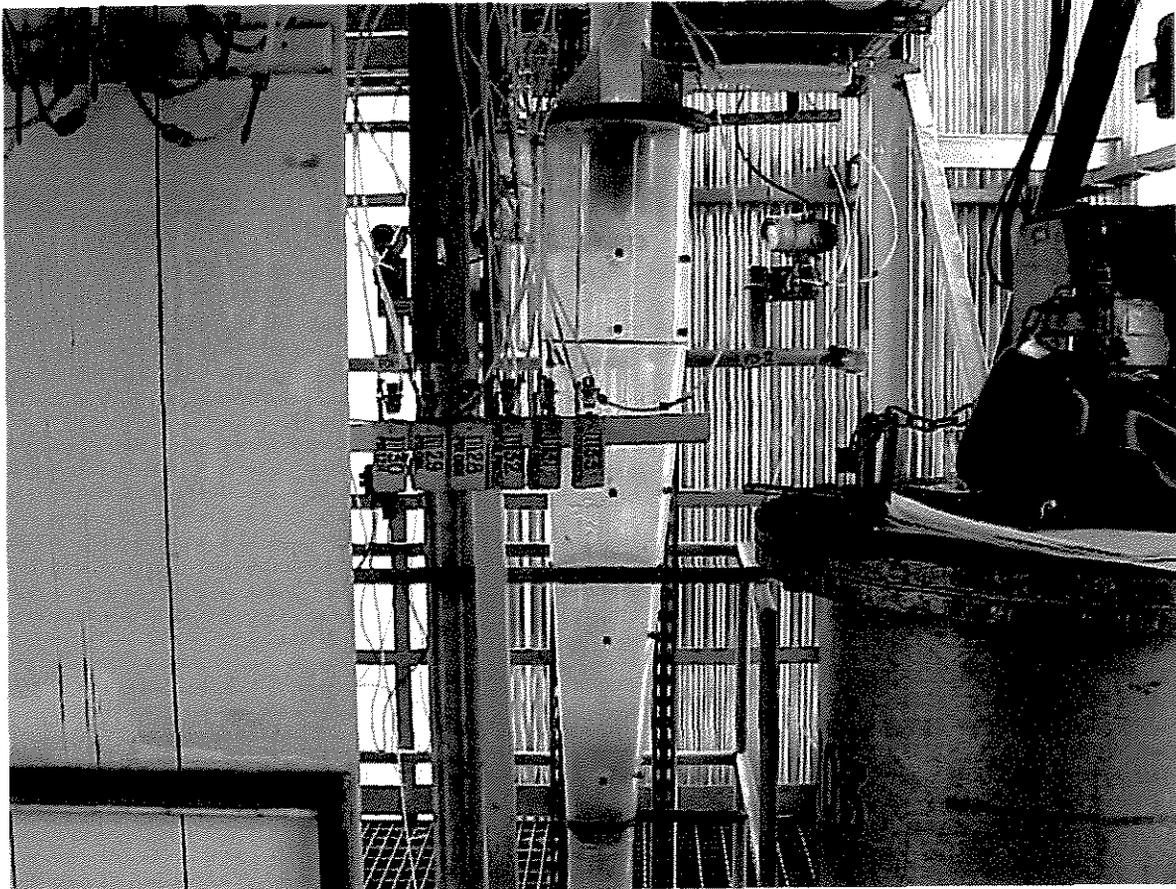


Figura 4.27 – Detalhe Fotográfico do ciclone utilizado.

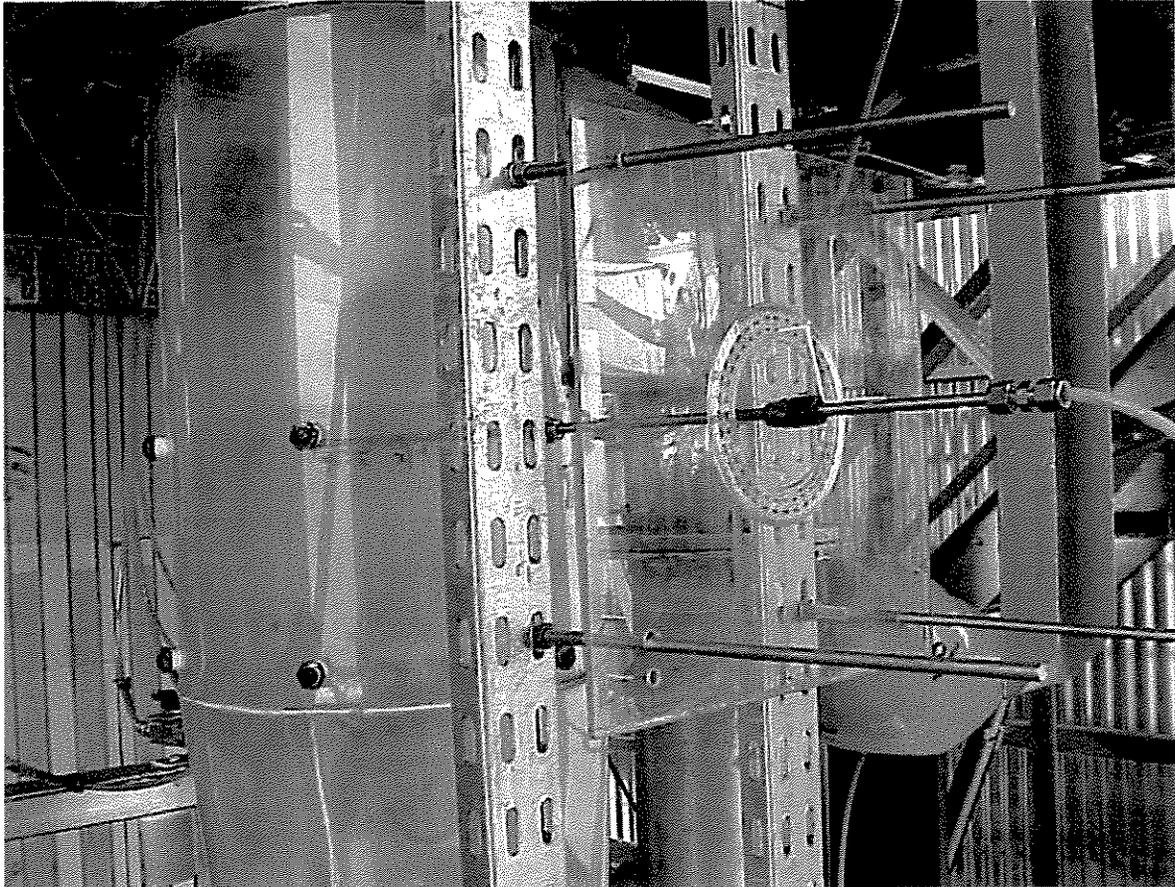


Figura 4.28 – Detalhe Fotográfico da sonda acoplada ao ciclone.

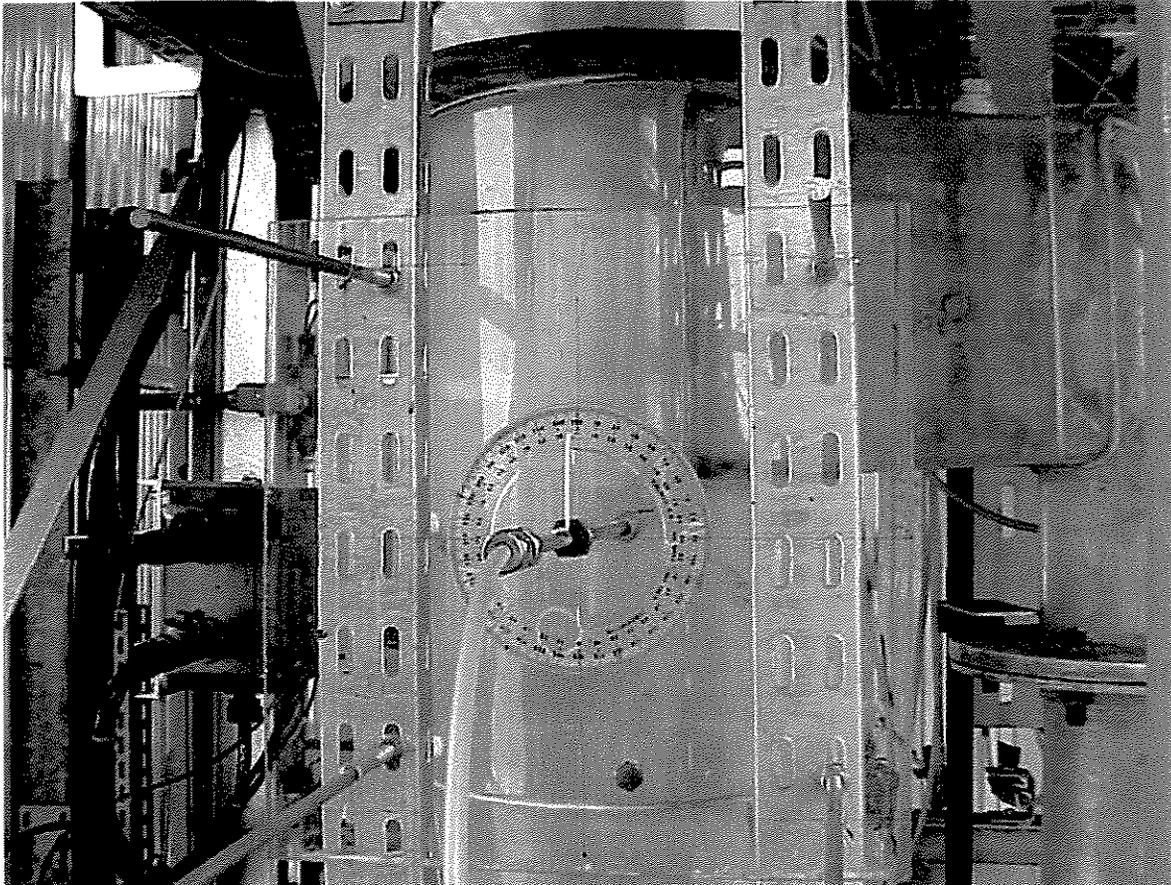


Figura 4.29 – Detalhe Fotográfico da sonda utilizada.

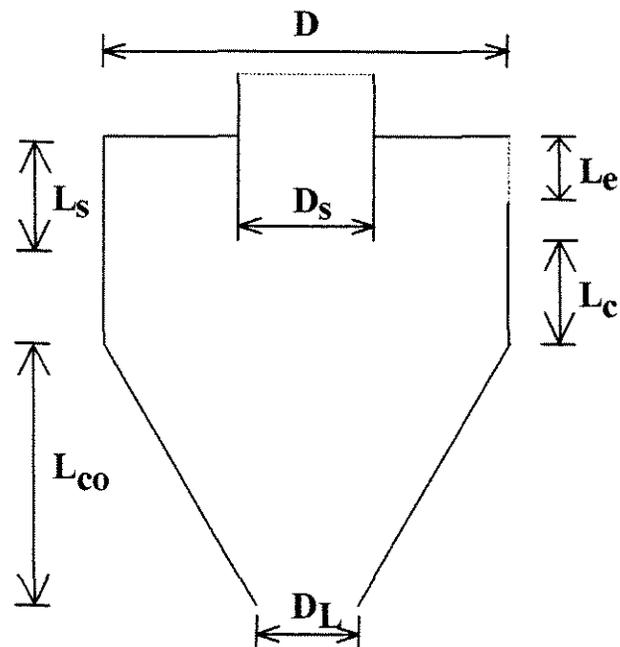


Figura 4.30 – Esquematização do ciclone utilizado.

Tabela 4.9 - Dimensões do ciclone experimental.

$L_e/D$	$D_s/D$	$L_s/D$	$L_c/D$	$L_{co}/D$	$D_L/D$
0,79	0,39	0,84	0,56	4,44	0,42

#### 4.4.1.b. Procedimento Experimental

O mapeamento do campo de velocidades do escoamento do gás, sem a presença de particulados, no interior ciclônico foi obtido experimentalmente por intermédio de uma sonda cilíndrica tipo Pitot inserida transversalmente no escoamento em cinco alturas previamente determinadas, ao longo de todo o ciclone, a fim de ser obtida a maior quantidade possível de dados experimentais para a posterior simulação do escoamento.

Trabalhou-se com corrente gasosa sem particulados pelo fato da presença de particulados, mesmo em pequena concentração, prejudicar a aferição dos resultados de queda de pressão coletados experimentalmente.

A sonda utilizada é industrial e foi previamente calibrada, sendo constituída de uma haste cilíndrica, com uma extremidade fechada com formato esférico, e com um orifício situado na parede lateral do corpo de prova. A outra extremidade é ligada a um manômetro. Determinaram-se a pressão de estagnação (definida como a pressão obtida quando o fluido em escoamento sofre desaceleração até atingir velocidade nula através de um processo livre de fricção) e a pressão estática (definida como aquela pressão que seria medida por um instrumento movendo-se com o escoamento), como definido em FOX e MCDONALD, 1981. A pressão de estagnação foi obtida girando-se a sonda em torno de seu eixo longitudinal. Ao se detectar a máxima deflexão manométrica, tem-se a pressão de estagnação no ponto de impacto. Já a pressão estática é especificada em função de um ângulo característico da sonda determinado no decorrer dos experimentos. O procedimento experimental adotado é detalhadamente encontrado em CREMASCO (1994).

O ciclone foi preparado para que as tomadas experimentais pudessem ser efetuadas. Para tanto, foram feitos pontos de inserção da sonda em cinco alturas ao longo do equipamento, sendo dois pontos na seção cilíndrica e três na seção cônica, os quais são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Pontos de tomada experimental.

Distância do topo do ciclone	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
	0,90D	1,35D	2,39D	3,36D	4,32D

#### 4.4.1.c. Resultados Experimentais

Nos experimentos, trabalhou-se com duas vazões de alimentação de ar: 750 Nm<sup>3</sup>/h ( $v_0 = 11,0$  m/s) e 850 Nm<sup>3</sup>/h ( $v_0 = 12,5$  m/s), por ser esta a faixa de operação normalmente utilizada na unidade em que foram efetuadas as medidas. O valor médio para a queda de pressão total, ou seja a pressão medida entre a entrada e a saída do ar do ciclone, verificado durante os ensaios experimentais, foi em torno de 1300 Pa para a velocidade de entrada do ar 11,0 m/s e cerca de 1800 Pa para a velocidade de entrada do ar de 12,5 m/s.

Em cada uma das 5 alturas (pontos de medida) do ciclone, obteve-se a distribuição da velocidade. Para tanto, foram coletados, em média, 8 pontos radiais na seção cilíndrica e variando entre 5 e 6 pontos na seção cônica do equipamento. A Tabela 4.11 sintetiza as condições operacionais durante o transcorrer dos experimentos.

Tabela 4.11 - Resultados experimentais da distribuição de velocidade tangencial.

velocidade tangencial (m/s)								
ponto 1			ponto 2			ponto 3		
$r/R_D$	$v_0=11,0$	$v_0=12,5$	$r/R_D$	$v_0=11,0$	$v_0=12,5$	$r/R_D$	$v_0=11,0$	$v_0=12,5$
0	4,18	6,21	0	8,85	6,246	0	6,37	8,40
0,065	6,08	13,26	0,065	9,90	11,90	0,094	12,98	
0,161	21,22	24,19	0,161	15,93	17,96	0,25	23,81	20,98
0,226	29,80	28,36	0,226	25,26	28,57	0,49	17,90	24,51
0,419	22,50	26,92	0,419	21,20	21,47	0,766	14,33	17,96
0,581	18,00	20,10	0,581	16,53	18,60	0,953	11,10	15,35
0,774	14,73	17,62	0,774	14,36	18,62			
0,968	11,83	10,85	0,968	13,69	16,33			
ponto 4			ponto 5					
$r/R_D$	$v_0=11,0$	$v_0=12,5$	$r/R_D$	$v_0=11,0$	$v_0=12,5$			
0	6,40	6,87	0	3,44	3,23			
0,143	15,14	14,62	0,26	15,69	17,66			
0,286	23,80	21,60	0,506	25,70	29,09			
0,476	20,00	27,13	0,753	19,23	27,74			
0,714	16,53	19,96	0,938	15,20	15,84			
0,952	10,29	17,44						

#### 4.4.2. Resultados Numéricos

As distribuições do componente de velocidade tangencial são obtidas para as duas velocidades de entrada do gás (11,0 e 12,5 m/s) nas cinco alturas em que foram medidas experimentalmente. Para tanto, construiu-se no pré processador “BUILD”, uma malha com 72.500 células e que é mostrada na Figura 4.31. As Figuras 4.27 a 4.36 apresentam a comparação entre os resultados experimentais e os resultados numéricos obtidos usando-se o esquema de interpolação “higher upwind”.

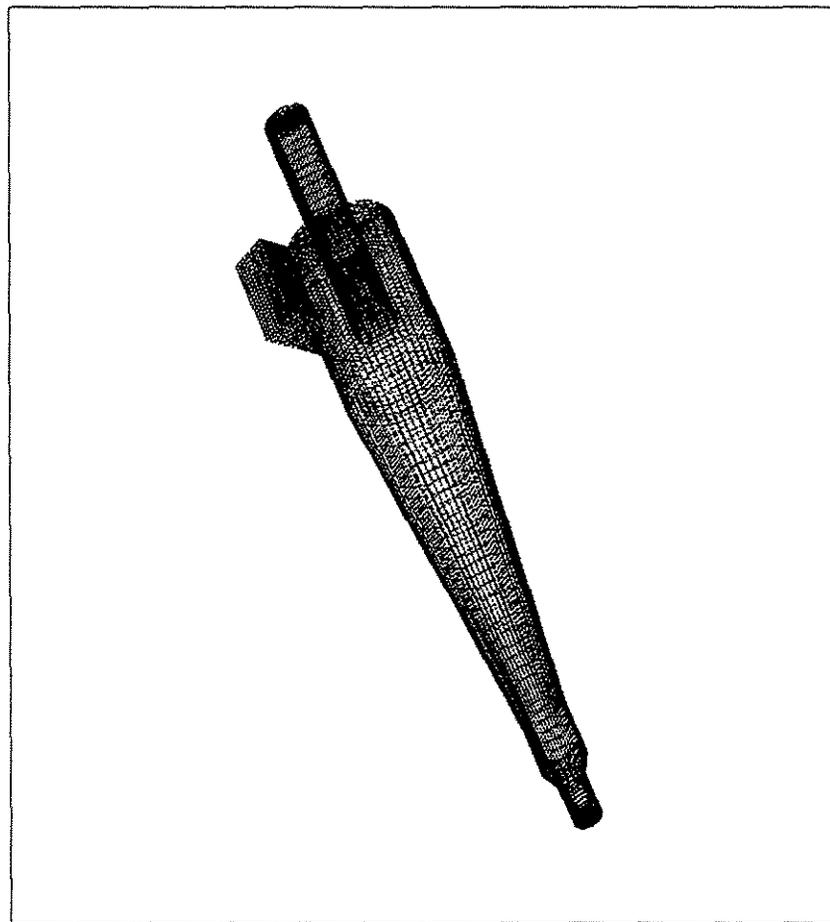


Figura 4.31 – Malha 3-D do ciclone – Caso 3.

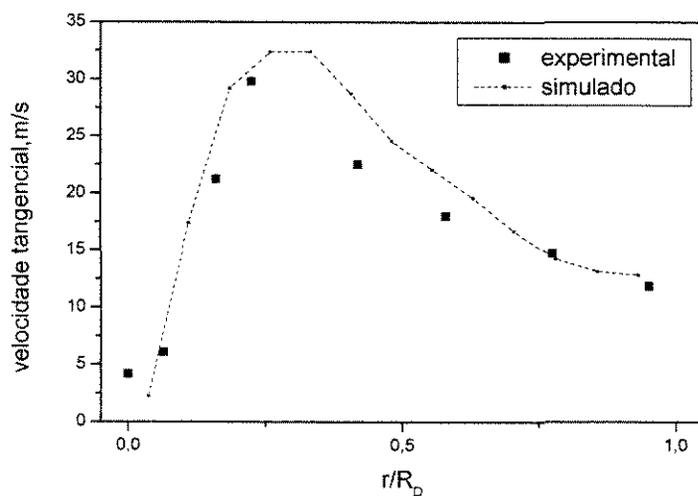


Figura 4.32 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 1 –  $v_0 = 11,0 \text{ m/s}$ ).

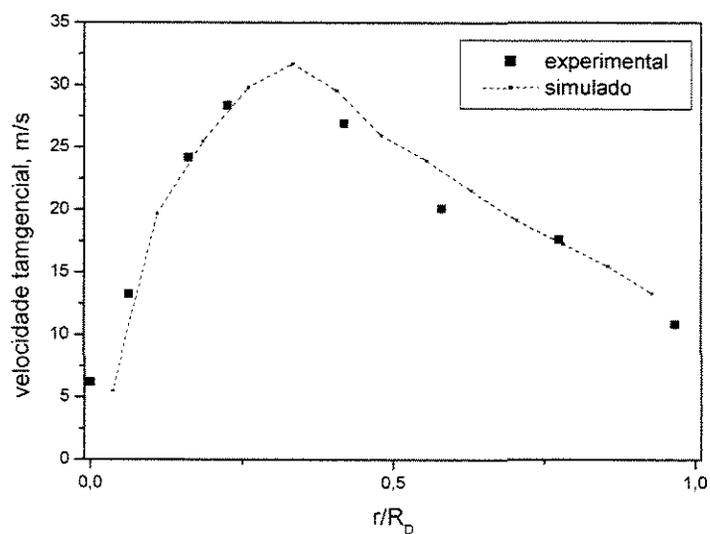


Figura 4.33 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 1 –  $v_0 = 12,5 \text{ m/s}$ ).

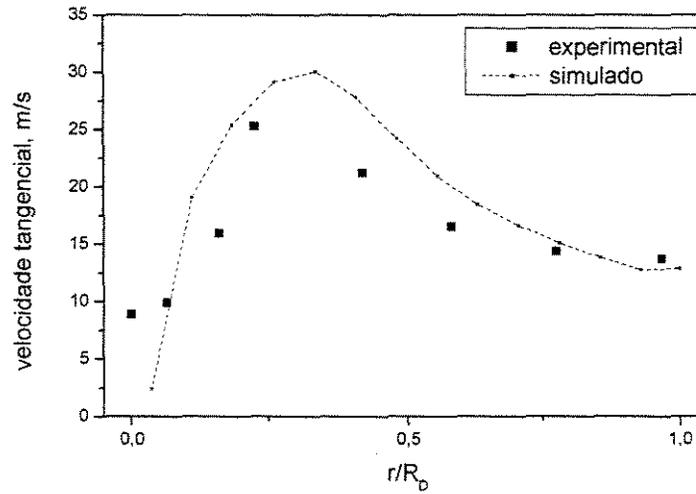


Figura 4.34 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 2 –  $v_0 = 11,0$ m/s).

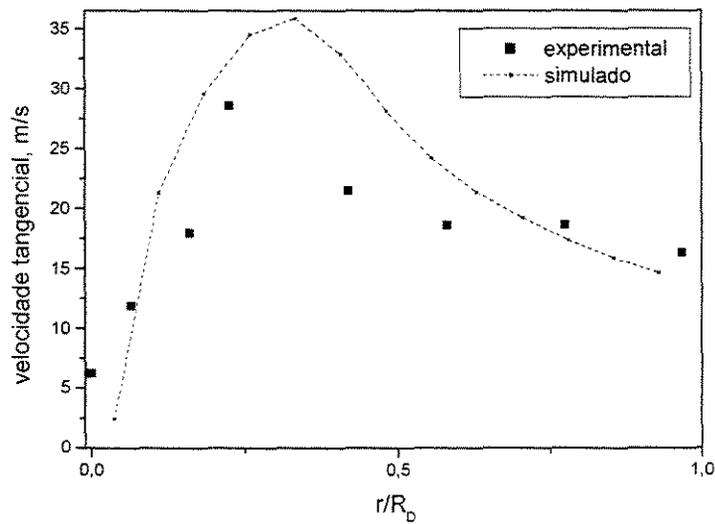


Figura 4.35 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 2 –  $v_0 = 12,5$ m/s).

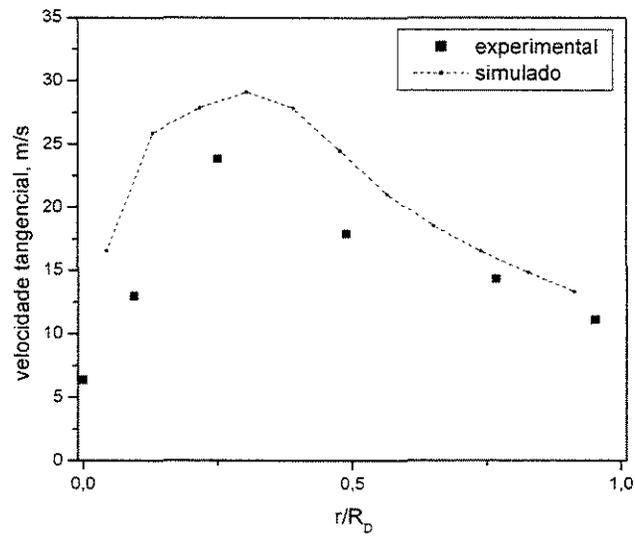


Figura 4.36 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 3 –  $v_0 = 11,0 \text{ m/s}$ ).

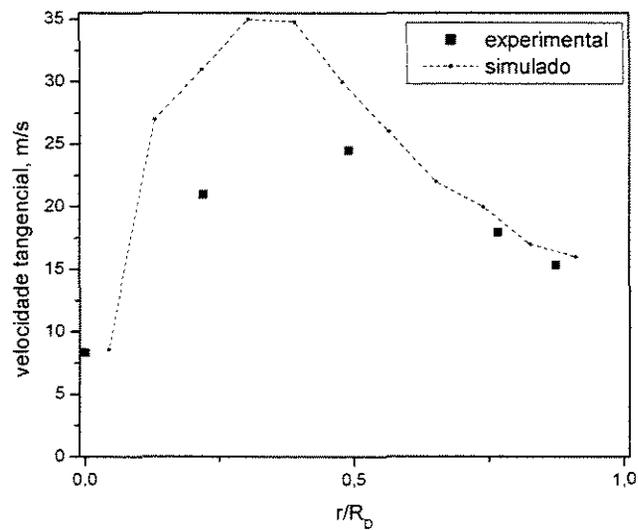


Figura 4.37 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 3 –  $v_0 = 12,5 \text{ m/s}$ ).

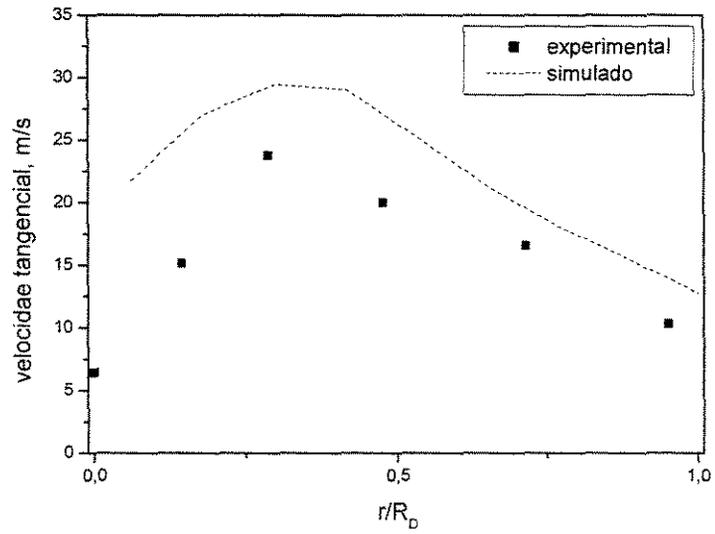


Figura 4.38 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 4 – v<sub>0</sub> = 11,0m/s).

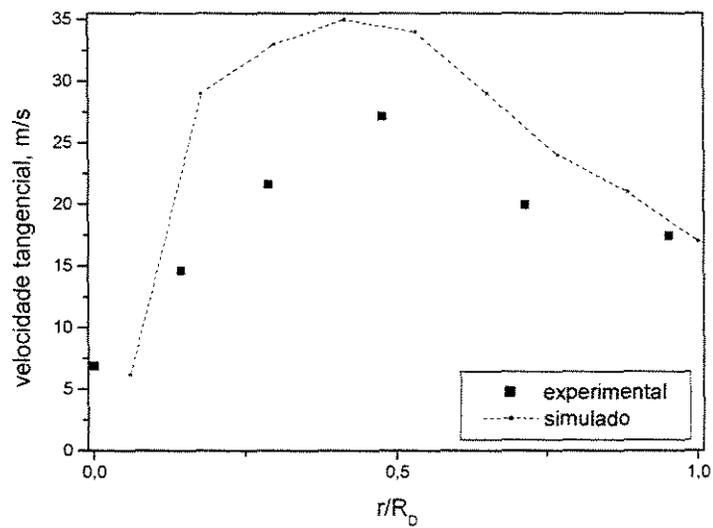


Figura 4.39 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 4 – v<sub>0</sub> = 12,5m/s).

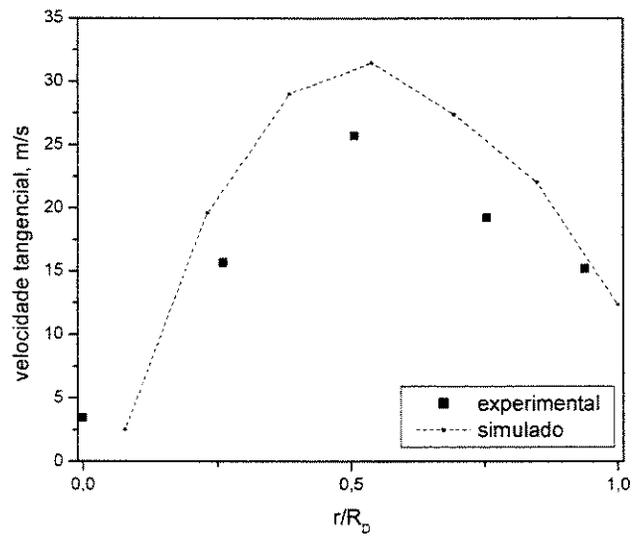


Figura 4.40 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 5 –  $v_0 = 11,0$  m/s).

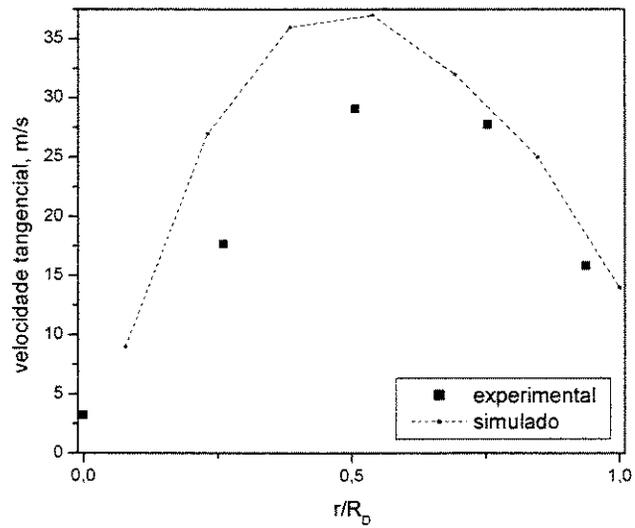


Figura 4.41 – Distribuição da velocidade tangencial (ponto 5 –  $v_0 = 12,5$  m/s).

Pela inspeção das Figuras 4.32 a 4.41, verifica-se que, para as duas velocidades de entrada do gás (11,0 e 12,5 m/s), o modelo de turbulência DSM empregado se mostra capaz de representar o escoamento do gás no ciclone. As distribuições das velocidades tangenciais obtidas nas simulações apresentam boa concordância com as distribuições obtidas experimentalmente, principalmente na seção cilíndrica do ciclone (pontos 1 e 2). Na seção cônica, constata-se que os resultados numéricos foram super estimados, provavelmente devido a imperfeições na superfície acrílica do cone observadas durante os experimentos.

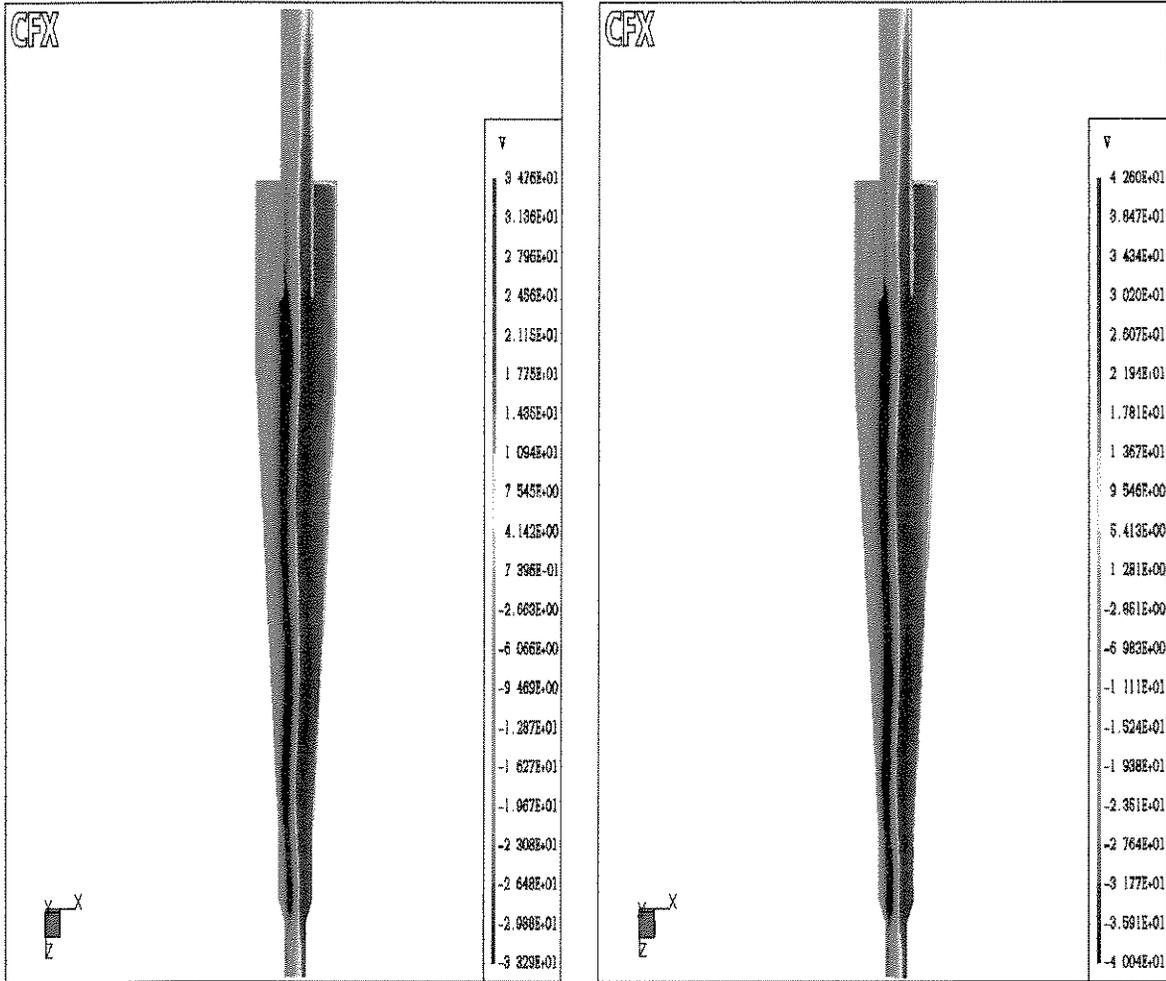
As Figuras 4.42 e 4.43 apresentam os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial e pressão ao longo de todo o ciclone, para as duas velocidades de entrada do gás.

A análise da Figura 4.42 permite concluir que o fenômeno de preservação da alta vorticidade do escoamento é reproduzido nas simulações, sendo que a alta velocidade de giro, aproximadamente o triplo da velocidade de entrada do ar, é encontrada praticamente nas mesmas posições radiais ao longo de todo o equipamento para as duas velocidades de entrada do ar, ou seja, em uma região correspondente à região interna ao tubo de saída do gás, sendo o vórtice gradualmente atenuado em direção à parede externa do ciclone.

Pela Figura 4.43, na qual é mostrado o mapeamento dos campos de pressão, observa-se uma região de baixa pressão que se estende por todo o ciclone, situando-se próxima ao eixo de simetria do equipamento. O comportamento fluidodinâmico do escoamento do gás neste caso pode ser associado às observações já feitas para o Caso 1 e para as configurações geométricas 1 e 3 do Caso 2.

Observa-se também boa concordância entre os valores de queda de pressão prescritos nas simulações e os valores experimentais. A queda de pressão entre a entrada e a saída do gás do ciclone nas simulações para a velocidade de entrada do ar de 11,0 m/s é de 1400 Pa enquanto o valor medido experimentalmente é de 1300 Pa. Para a velocidade de entrada do ar de 12,5 m/s, tanto a queda de pressão simulada quanto a experimental é da ordem de 1800 Pa.

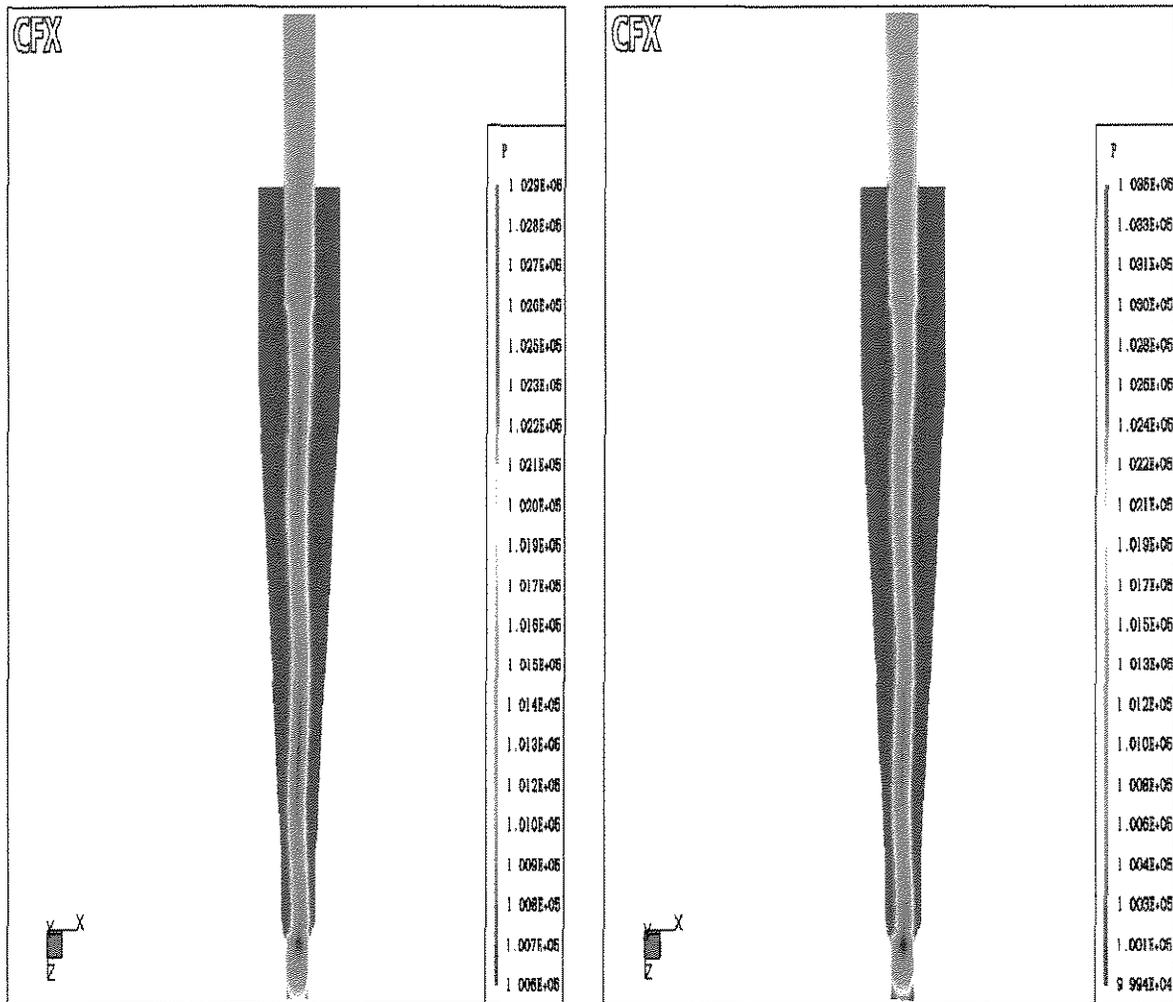
Os resultados referentes a este estudo de caso foram publicados no trabalho de PERES et al. (2002a).



(a)  $v_0 = 11,0 \text{ m/s}$

(b)  $v_0 = 12,5 \text{ m/s}$

Figura 4.42 – Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 3.



(a)  $v_0 = 11,0\text{m/s}$

(b)  $v_0 = 12,5\text{m/s}$

Figura 4.43 – Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 3.

#### 4.5. Estudo de Caso 4 – CRISTEA et al. (1996)

O ciclone utilizado por CRISTEA et al. (1996) é o primeiro caso abordado neste trabalho cuja entrada é em voluta, sendo assim as Figuras 4.44 e 4.45 apresentam detalhes das malhas de uma entrada tangencial e de uma entrada em voluta. O ciclone tem as dimensões apresentadas na Tabela 4.12, sendo que a malha numérica utilizada nas simulações tem aproximadamente 74.000 células e é mostrada na Figura 4.46.

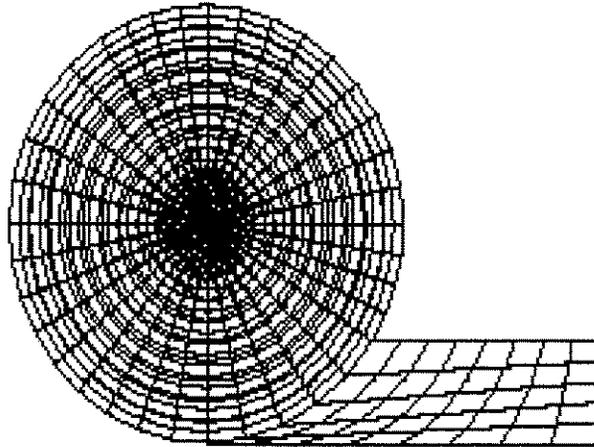


Figura 4.44 – Detalhe da malha de um ciclone com entrada tangencial.

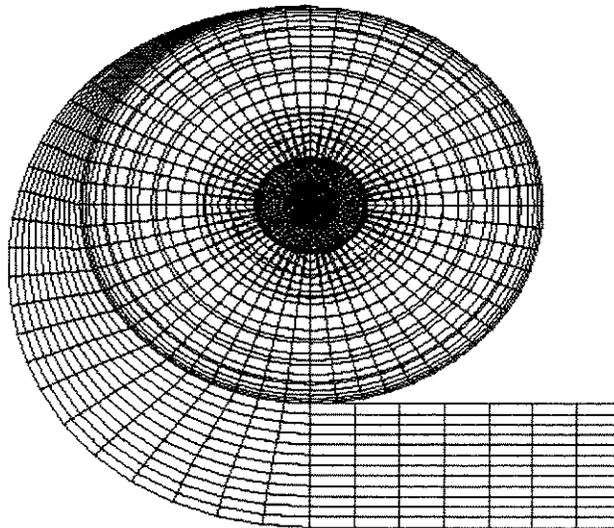


Figura 4.45 – Detalhe da malha de um ciclone com entrada em voluta.

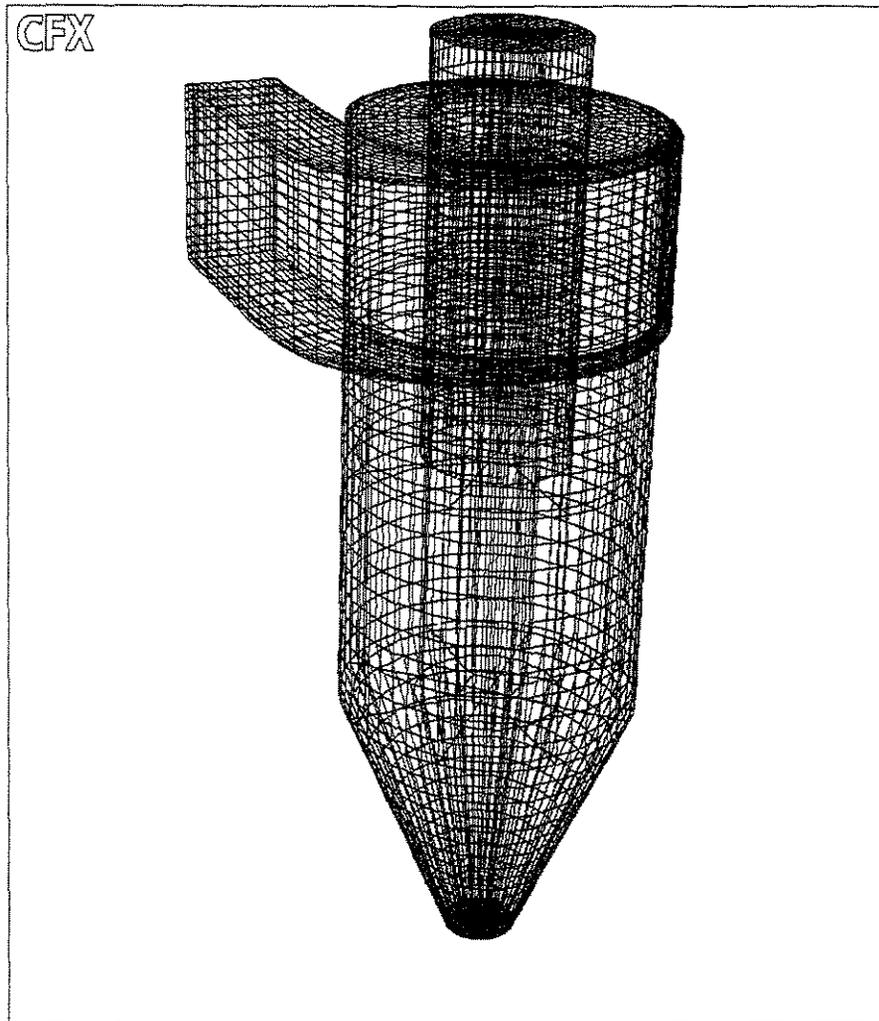


Figura 4.46 – Malha 3-D do ciclone – Caso 4.

Tabela 4.12 - Dimensões características do ciclone – Caso 4.

$D_C$ (m)	0,288
$D_S$ (m)	0,143
$D_L$ (m)	0,070
$L_C$ (m)	0,226
$L_e$ (m)	0,150
$L_S$ (m)	0,284
$L_{CO}$ (m)	0,234

CRISTEA et al. (1996) realizaram medidas da distribuição da velocidade tangencial em um ponto a 0,33 m do topo do ciclone, pouco abaixo do tubo de saída do gás, em um ciclone com entrada em voluta e diâmetro da coluna cilíndrica de 0,288 m, como mostrado na Tabela 4.12. A velocidade de entrada do ar utilizada nos experimentos foi de 4,64 m/s.

A estratégia de solução adotada para os ciclones com entrada em voluta é a mesma para os ciclones com entrada tangencial, destaca-se apenas que a entrada em voluta tende a dificultar a convergência do problema, exigindo maior tempo computacional para que o critério de convergência seja alcançado.

Os resultados numéricos são confrontados com os dados experimentais apresentados pelos autores, como mostrado na Figura 4.47. Observa-se que há deslocamento da curva de distribuição da velocidade tangencial nos resultados numéricos.

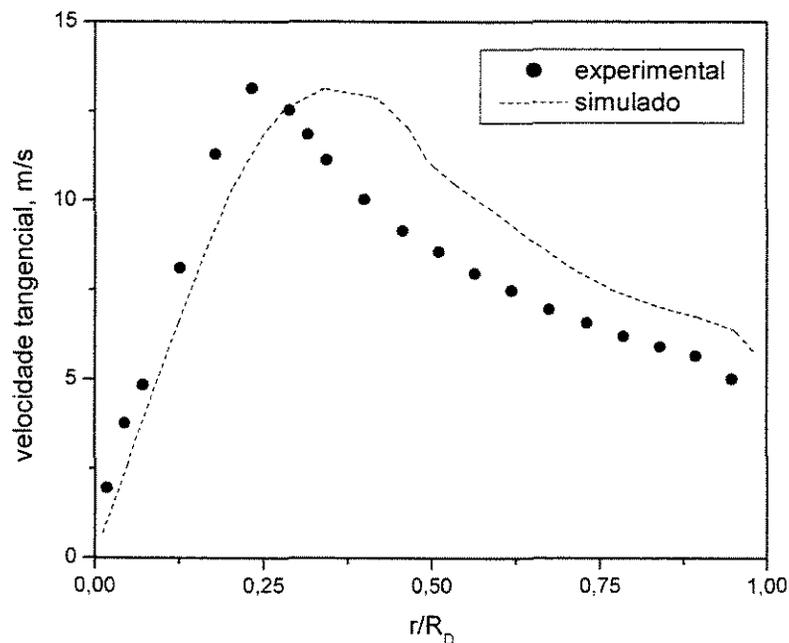


Figura 4.47 – Distribuição da velocidade tangencial – Caso 4.

A Figura 4.48 apresenta os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e pressão ao longo de todo o ciclone.

Pela inspeção da Figura 4.48, observa-se que a região de alta velocidade de giro é bem estreita para este ciclone e a velocidade tangencial máxima é praticamente o triplo da velocidade de entrada do ar, embora o diâmetro do tubo de saída do gás seja a metade do diâmetro da coluna cilíndrica, como no ciclone do Caso 1 e configurações geométricas 1 e 3 do Caso 2, levando a supor que a velocidade tangencial máxima esperada seria próxima do dobro da velocidade de entrada do ar. Este incremento de velocidade pode ser atribuído ao efeito da entrada em voluta, pois o escoamento giratório é favorecido.

Nota-se ainda que a região de baixa pressão se estende ao longo de todo o equipamento, sendo que o padrão de escoamento do gás no interior ciclônico é semelhante aos casos anteriormente apresentados. A queda de pressão para este ciclone é da ordem de 350 Pa.



#### 4.6. Estudo de Caso 5 – Ciclone industrial I

Neste tópico, bem como no próximo, ou seja, os estudos de caso 5 e 6 tratam da predição do escoamento do gás no interior de ciclone industriais. Os resultados obtidos neste tópico são referentes às simulações numéricas de um ciclone de dimensões industriais com entrada em voluta e cuja configuração é bastante empregada na indústria de cimento. O intuito deste estudo é predizer os campos de velocidade e pressão do gás no interior ciclônico, partindo-se em trabalhos futuros para a validação destes resultados com modernas técnicas de medição experimental, visando a melhoria da performance do equipamento. A Figura 4.49 apresenta a malha utilizada nas simulações, a qual é constituída por 77.000 células e tem um coletor de sólidos acoplado ao equipamento. As características adimensionalizadas do ciclone são mostradas na Tabela 4.13.

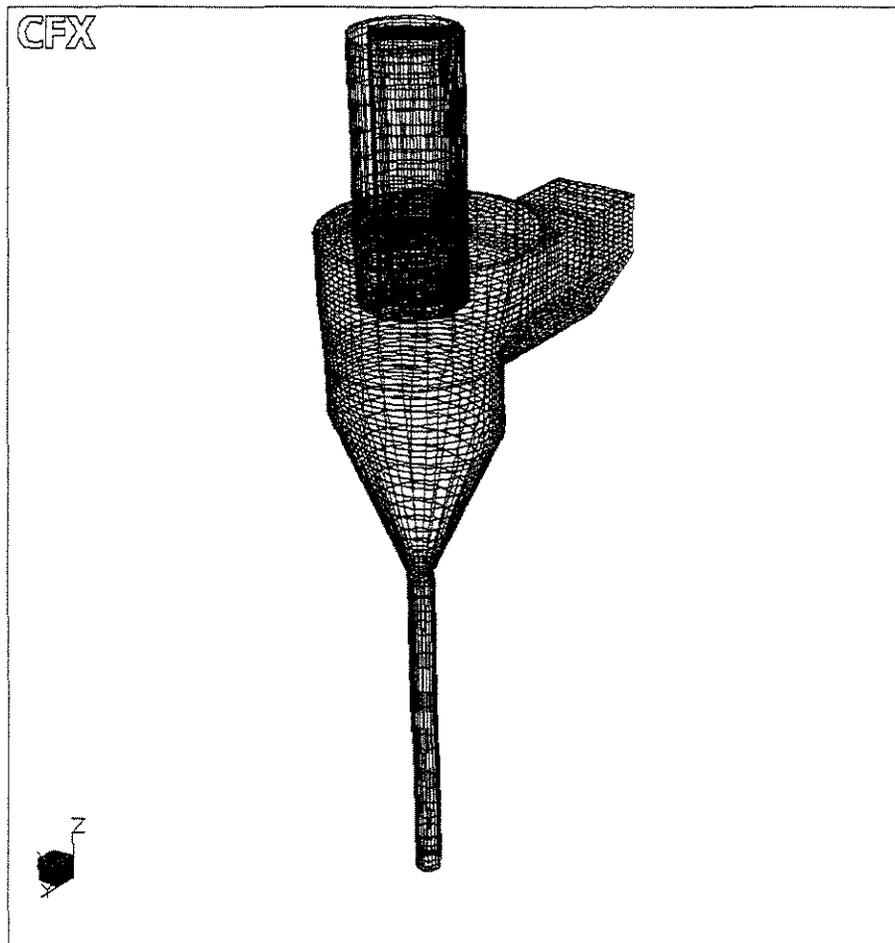


Figura 4.49 – Malha 3-D do ciclone – Caso 5.

Tabela 4.13 - Dimensões do ciclone – Caso 5.

$D_s/D_c$	$D_l/D_c$	$L_e/D_c$	$L_c/D_c$	$L_s/D_c$	$L_{co}/D_c$
0,57	0,16	0,34	0,71	0,43	0,99

As distribuições de velocidade tangencial do gás são apresentadas em quatro alturas ao longo do ciclone, sendo duas na seção cilíndrica e duas na seção cônica do equipamento, como mostrado na Tabela 4.14. A velocidade de entrada do gás (ar) no ciclone usada nas simulações é a mesma das condições operacionais em uma indústria de cimento, 15,8m/s, e os resultados obtidos podem ser vistos nas Figuras 4.50 a 4.53. Os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e pressão são apresentados na Figura 4.54.

Confrontando-se as distribuições de velocidade tangencial, principalmente nos pontos 1 e 2 situados na seção cilíndrica do ciclone (ilustradas pelas Figuras 4.50 e 4.51), com os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e pressão (Figura 4.54), evidencia-se que a entrada em voluta faz com que o escoamento seja bastante assimétrico, sendo que a velocidade tangencial máxima é praticamente o dobro da velocidade de entrada do ar. Observa-se que a região de alta velocidade de giro do escoamento se estende ao longo de todo o ciclone, inclusive em boa parte do coletor de sólidos, sendo que a região de baixa pressão também apresenta comportamento análogo ao da velocidade tangencial, ou seja, encontra-se ao longo de todo o ciclone, indicando que a reversão do escoamento não se dá rapidamente.

A queda de pressão verificada nas simulações para este ciclone industrial é da ordem de 500 Pa.

Tabela 4.14 – Pontos de obtenção das distribuições de velocidade tangencial.

Distância do topo do ciclone	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
	$0,53D_c$	$0,8D_c$	$1,27D_c$	$1,67D_c$

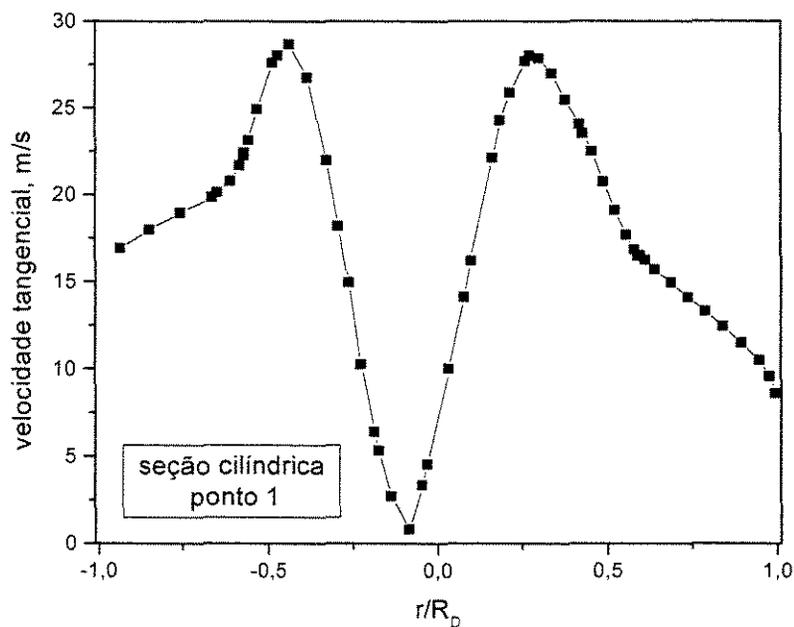


Figura 4.50 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 1).

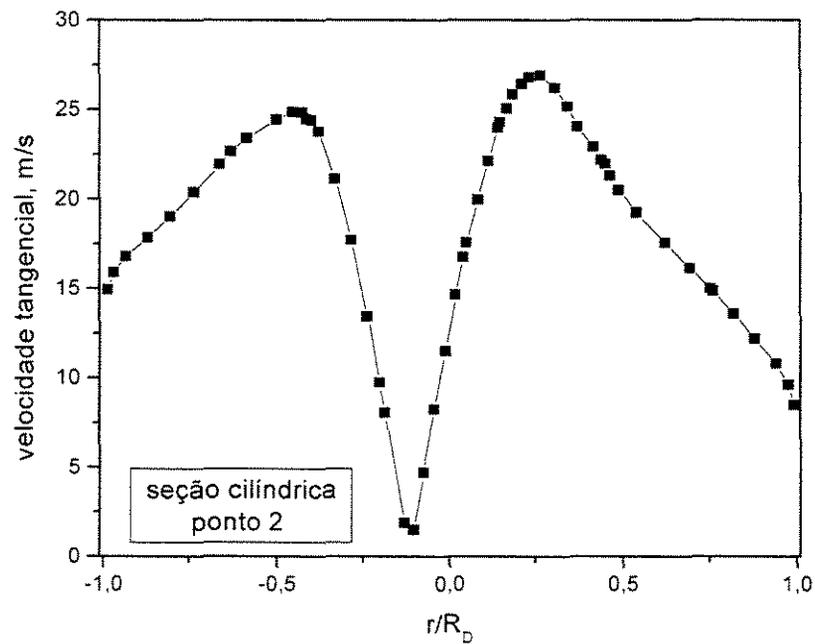


Figura 4.51 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 2).

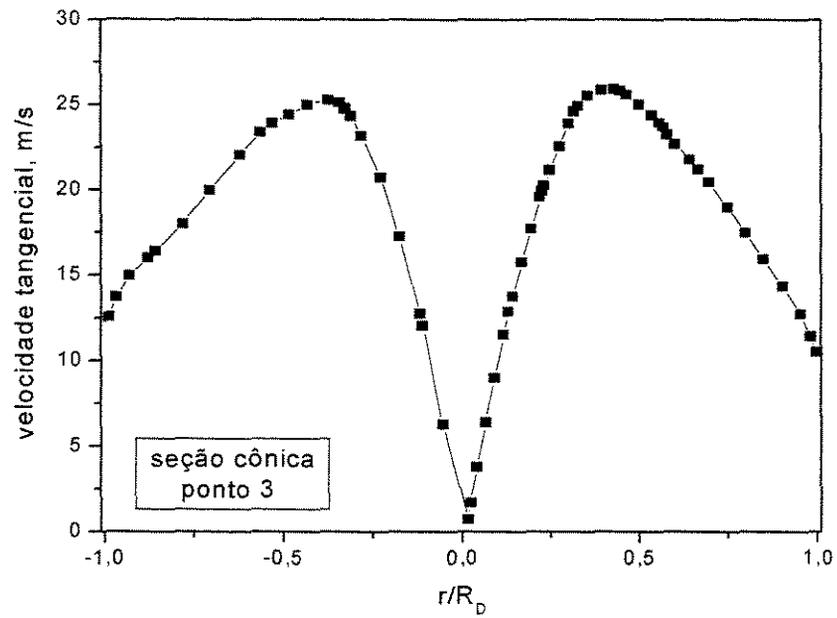


Figura 4.52 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 3).

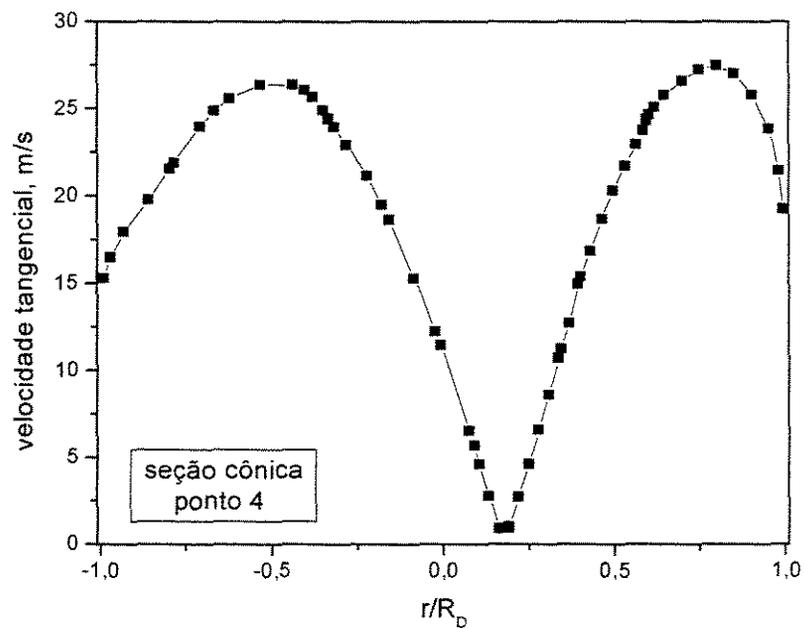


Figura 4.53 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 4).

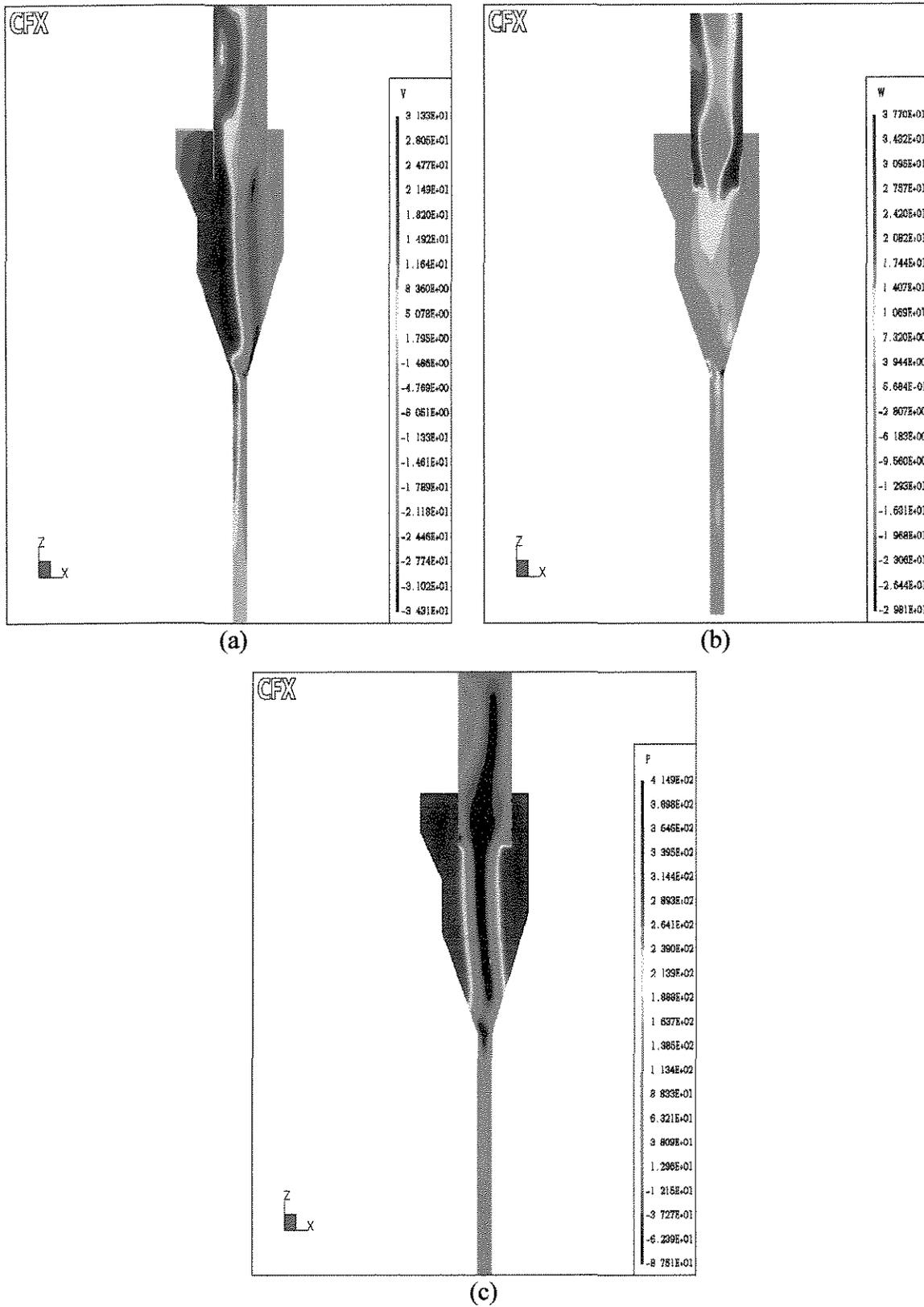


Figura 4.54 – Mapeamentos dos campos de (a) velocidade tangencial, (b) velocidade axial e (c) pressão.

### 5.7. Estudo de Caso 6 – Ciclone industrial II

O intuito deste estudo é prever os campos de velocidade e pressão do gás no interior ciclônico, partindo-se em trabalhos futuros para a validação destes resultados com medidas experimentais a serem feitas com a utilização de LDV, visando a melhoria da performance do equipamento. O ciclone industrial II apresenta entrada em voluta e sua configuração é bastante empregada na indústria de petróleo, suas características geométricas adimensionalizadas são apresentadas na Tabela 4.15. A Figura 4.55 mostra a malha utilizada nas simulações, a qual é constituída por aproximadamente 67.000 células.

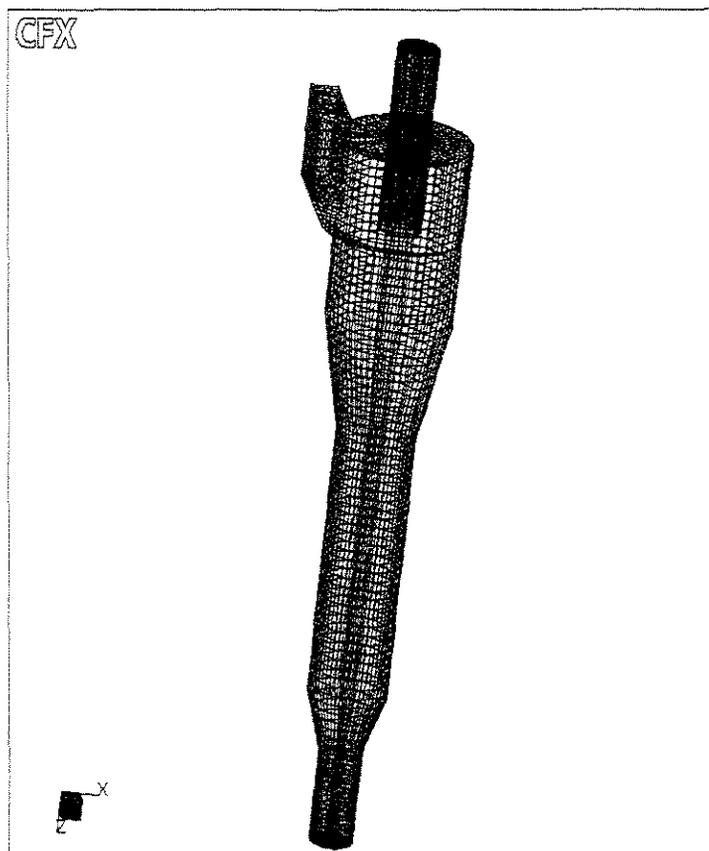


Figura 4.55 – Malha 3-D do ciclone – Caso 6.

Tabela 4.15 - Dimensões do ciclone – Caso 6.

$D_S/D_C$	$D_L/D_C$	$L_e/D_C$	$L_C/D_C$	$L_S/D_C$	$L_{CO}/D_C$
0,43	0,40	0,69	0,45	0,72	1,33

A velocidade de entrada do ar usada nas simulações é de 15,0 m/s, sendo que as distribuições do componente de velocidade tangencial preditas para o ciclone industrial II, em duas alturas do ciclone (uma na seção cilíndrica e uma na seção cônica), são mostradas na Figuras 4.56 e 4.57. Os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial e pressão são apresentados na Figura 4.58.

A velocidade tangencial máxima é praticamente o triplo da velocidade de entrada do ar e a queda de pressão predita para o escoamento é da ordem de 2400 Pa.

Como observado no caso anterior, a configuração geométrica deste ciclone industrial torna o escoamento no interior ciclônico bastante assimétrico. Destaca-se também, pela inspeção dos mapeamentos dos campos de velocidade tangencial e pressão da Figura 4.58, que o escoamento apresenta uma pequena região de baixa pressão e uma pequena região de alta vorticidade (representada pela cor rosa), o que acarreta a reversão mais rápida do escoamento.

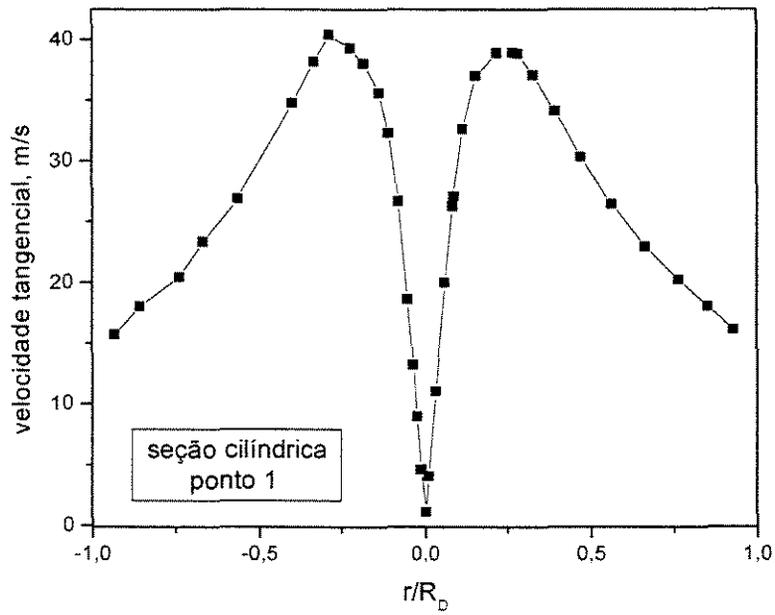


Figura 4.56 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 1).

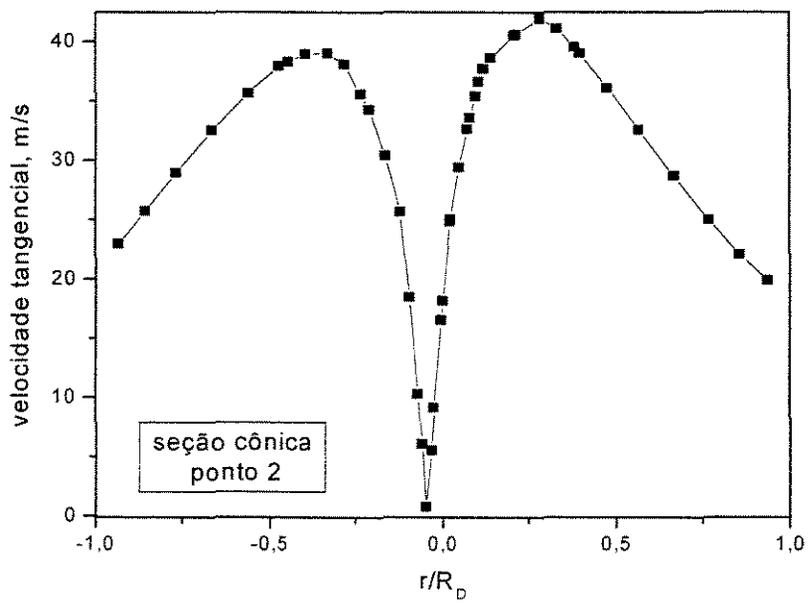


Figura 4.57 – Distribuição numérica da velocidade tangencial (ponto 2).

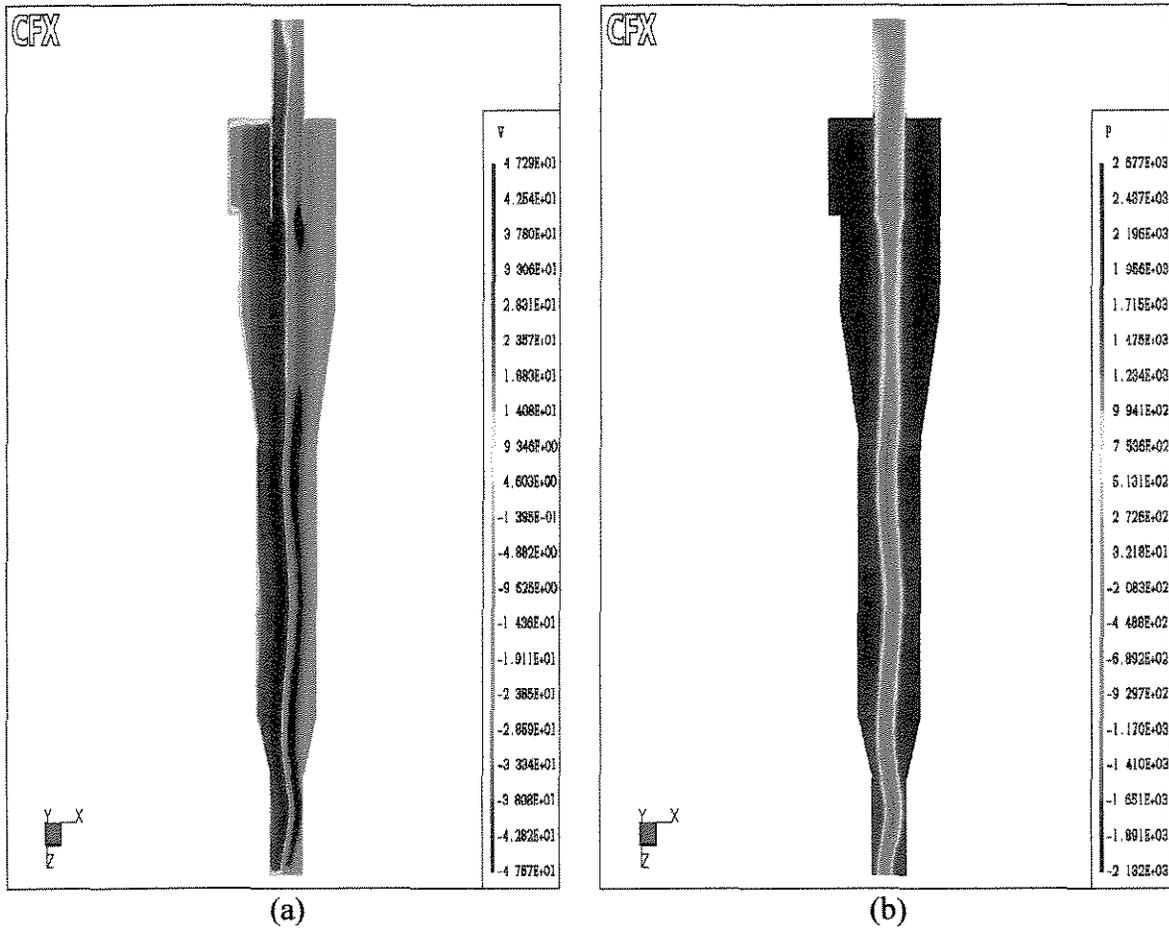


Figura 4.58 – Mapeamentos dos campos de (a) velocidade tangencial e (b) pressão.

#### 4.8. Comparação entre os Resultados Numéricos para o Escoamento do Gás

Uma síntese dos resultados para a simulação do escoamento do gás em ciclones obtidos neste capítulo, levando em consideração as principais características geométricas (a relação entre o diâmetro do tubo de saída do gás e o diâmetro do ciclone -  $\frac{D_s}{D_c}$  e a relação entre o diâmetro de saída de sólidos e o diâmetro do ciclone -  $\frac{D_L}{D_c}$ ) e condições operacionais de cada caso estudado, é apresentada na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Síntese dos Resultados Numéricos para o Escoamento do Gás.

	Características Geométricas		Condições de Operação		
	$\frac{D_s}{D_c}$	$\frac{D_L}{D_c}$	$v_0$ (m/s)	$\frac{w_{max}}{v_0}$	$\Delta P$ (Pa)
Caso 1	0,51	0,25	9,8	2	350
			13,4	2	600
			18,0	2	1100
Caso 2					
Geometrias 1 e 3	0,50	0,25	7,75	2	350
Geometrias 2 e 4	0,25	0,25		3	2300
Caso 3	0,39	0,42	11,0	3	1400
			12,5	3	1800
Caso 4	0,50	0,24	4,64	3	350
Caso 5	0,57	0,16	15,8	2	500
Caso 6	0,43	0,40	15,0	3	2400

O principal objetivo da confecção da Tabela 4.16 é salientar a importância das características geométricas de cada ciclone, incluindo-se o fato o efeito da entrada tangencial ou em voluta, nas observações já feitas sobre as peculiaridades do escoamento do gás em cada um dos ciclones abordados neste capítulo.

Adicionalmente, outras informações importantes podem ser extraídas da Tabela 4.16. Nota-se que as maiores quedas de pressão são verificadas nos ciclones que apresentam o diâmetro do tubo de saída de gás praticamente igual ao diâmetro do tubo de saída de sólidos, como é observado nas Geometrias 2 e 4 do Caso 2, bem como no Caso 3 e no Caso 6.

A entrada em voluta causa um maior incremento na velocidade tangencial que a entrada tangencial, fato observado quando é comparado, por exemplo, o Caso 1 (entrada tangencial) e o Caso 4 (entrada em voluta).

Verificando-se que o modelo CFD tridimensional empregado neste trabalho representa satisfatoriamente o escoamento do gás em ciclones e suas particularidades, parte-se para a verificação da influência da fase particulada no escoamento, a ser apresentada no Capítulo 5.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS NUMÉRICOS DO ESCOAMENTO GÁS-PARTICULADOS EM CICLONES

Neste capítulo, são apresentados os resultados numéricos das simulações do escoamento bifásico (gás com a presença de particulados) em uma abordagem Euleriana-Euleriana, cujo objetivo é introduzir e analisar os efeitos da fase particulada sobre o escoamento da fase gasosa. Divide-se a apresentação entre as considerações do modelo adotado e os dois estudos de caso envolvendo o escoamento do gás com a presença de particulados abordados neste trabalho, o Caso 7 - ciclone com entrada tangencial de PATTERSON e MUNZ (1989) e cujas simulações do escoamento do gás foram apresentadas no Caso 2 do Capítulo 4 e o Caso 8 - ciclone industrial I, com entrada em voluta, apresentado no Caso 5 do Capítulo 4.

#### 5.1. A Abordagem Euleriana-Euleriana

Como apresentado no Capítulo 2, os trabalhos encontrados na literatura geralmente tratam da simulação tridimensional de ciclones em uma abordagem Euleriana-Lagrangeana, ou seja, os efeitos da fase particulada sobre a fase gasosa são desprezados, já que as partículas são tratadas como partículas isoladas.

Neste trabalho, adota-se um modelo Euleriano-Euleriano, em que os efeitos do escoamento da fase particulada sobre a fase gasosa são introduzidos e analisados quanto à fluidodinâmica do escoamento, avaliando-se dados globais de queda de pressão e eficiência de coleta, além da distribuição da velocidade tangencial e axial do gás.

As simulações do escoamento no interior ciclônico são realizadas em regime transiente, no qual as soluções para o escoamento do gás são usadas como condição inicial quando é introduzida a fase particulada. A fase particulada é considerada invíscida, em virtude de sua pequena fração volumétrica (escoamento diluído), comportando-se como um contínuo e sendo caracterizada por um diâmetro médio das partículas.

## 5.2. Estudo de Caso 7 - PATTERSON e MUNZ (1989)

Os dados numéricos de distribuição de velocidades obtidos nas simulações do escoamento do gás, quando comparados com os dados experimentais do trabalho de PATTERSON e MUNZ (1996), apresentados no Capítulo 4, mostram que a estratégia de solução empregada representa satisfatoriamente o escoamento do gás em ciclones.

Destarte, parte-se para a realização de simulações com a implementação de um modelo Euleriano-Euleriano para o escoamento do gás com a presença de particulados. Para tanto, são resgatados os resultados experimentais de um trabalho anterior dos mesmos autores (PATTERSON e MUNZ, 1989), no qual dados experimentais de eficiência de coleta e queda de pressão em um ciclone foram coletados experimentalmente. O ciclone utilizado corresponde à configuração geométrica 1, cujos resultados das simulações com gás foram apresentados no Caso 2 do Capítulo 4.

As simulações do escoamento gás-particulados são realizadas em regime transiente, com 12 segundos de tempo real para este caso, sendo que as soluções para o escoamento do gás são usadas como condição inicial. A fase particulada é constituída de partículas de sílica com diâmetro médio de 10  $\mu\text{m}$  e massa específica de 2600  $\text{kg/m}^3$ , sendo três vazões de alimentação de partículas de sílica (5,4; 44,2 e 79,7  $\text{g/m}^3$ ), como mostrado na Tabela 5.1, a qual sintetiza as condições operacionais utilizadas nas simulações.

Tabela 5.1 – Condições Operacionais – Caso 7.

Propriedades		
fase gás (ar)	velocidade de entrada (m/s)	15,2
	massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )	1,142
	viscosidade dinâmica (kg/ms)	$1,85 \cdot 10^{-5}$
fase particulada (sílica)	diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )	10
	velocidade de entrada (m/s)	15,2
	massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )	2600
	razão de carga ( $\text{g/m}^3$ )	Concentração volumétrica
	5,4	$3,72 \cdot 10^{-6}$
	44,2	$1,70 \cdot 10^{-5}$
	79,7	$6,13 \cdot 10^{-5}$

Primeiramente, analisa-se a influência da fase particulada nos parâmetros globais de queda de pressão e eficiência de coleta no ciclone. Os resultados numéricos para as três razões de alimentação de partículas de sílica (5,4; 44,2 e 79,7 g/m<sup>3</sup>) são comparados com os dados experimentais de PATTERSON e MUNZ (1989) e mostrados na Tabela 5.2.

Entende-se por razão de alimentação ou razão de carga ( $q_p$ ), muito empregada em escoamentos bifásicos, a relação entre a vazão mássica de sólidos ( $\dot{m}_p$ ) e a vazão volumétrica de gás ( $Q_g$ ), como definido na equação 5.1.

$$q_p = \frac{\dot{m}_p}{Q_g} \quad (5.1)$$

A eficiência global de coleta é definida como a razão entre a vazão mássica de particulados que é coletada  $\left(\dot{m}_p\right)_L$  menos a vazão mássica que é arrastada  $\left(\dot{m}_p\right)_S$ , ou seja, sai pelo tubo de saída do gás, pela vazão mássica de particulados que entra no ciclone,  $\left(\dot{m}_p\right)_{en}$  como mostrado na equação 5.2.

$$\text{Efic}(\%) = \frac{\left(\dot{m}_p\right)_L - \left(\dot{m}_p\right)_S}{\left(\dot{m}_p\right)_{en}} \cdot 100 \quad (5.2)$$

Tabela 5.2 – Comparação entre os dados experimentais e numéricos de queda de pressão e eficiência de coleta– Caso 7.

	exper.	numérico	exper.	numérico	exper.	numérico
$q_p$ (g/m <sup>3</sup> )	5,4		44,2		79,7	
$\Delta P$ (Pa)	933	650	933	450	579	390
Efic (%)	87	78	90	79	92	81

Nota-se, da Tabela 5.2, que o modelo é capaz de prever a diminuição da queda de pressão no ciclone com o aumento da razão de alimentação de sólidos, além do aumento da eficiência de coleta, corroborando as observações experimentais feitas por PATTERSON e MUNZ (1989).

A Figura 5.1 mostra as distribuições da velocidade tangencial do gás, sem e com a presença de particulados, para as três razões de alimentação de partículas de sílica utilizadas. Nota-se a influência da presença da fase particulada na distribuição da velocidade tangencial do gás no ponto de obtenção dos dados, situado pouco abaixo do tubo de saída de gás, à medida que se aumenta a razão de alimentação de sólidos, cuja tendência é a de se aglomerar junto à periferia ciclônica, diminui-se a velocidade tangencial do gás.

Embora resultados experimentais das distribuições de velocidade tangencial do gás com particulados não tenham sido apresentados por PATTERSON e MUNZ (1989), o comportamento apresentado corrobora as observações experimentais de YUU et al. (1978) e CREMASCO (1994). Estes autores verificaram que ao se aumentar a concentração de sólidos junto à periferia do ciclone, diminui-se a componente tangencial da velocidade da corrente gasosa.

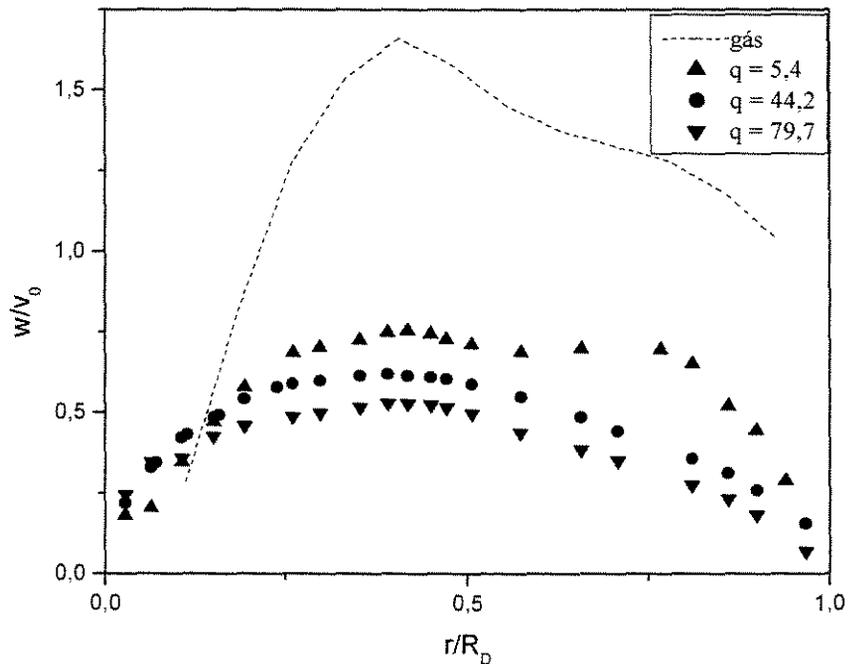


Figura 5.1 - Distribuições da velocidade tangencial da fase gasosa.

Para melhor ilustrar a influência da fase particulada no escoamento do gás, as Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente, apresentam os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e pressão do gás ao longo do ciclone, para o escoamento do gás e para as três razões de alimentação de sólidos.

Pela análise da Figura 5.2, em que são apresentados os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial do gás, verifica-se que não ocorre a preservação do escoamento giratório ao longo de todo o equipamento como verificado para o escoamento monofásico (somente ar), à medida que se aumenta a concentração de particulados na alimentação, a reversão do escoamento do gás se dá mais rapidamente. Percebe-se também a influência da fase particulada na diminuição do pico da velocidade tangencial, como já demonstrado nas distribuições da velocidade tangencial da Figura 5.1.

A Figura 5.3 mostra os mapeamentos dos campos de velocidade axial da fase gasosa, onde é possível verificar que a região de máxima velocidade axial (representada pela coloração vermelha) sofre grande influência da atenuação do escoamento giratório. A região de máxima velocidade axial, a qual se situava próxima às paredes do tubo de saída do gás (comportamento observado no escoamento monofásico) e passa a se localizar em uma larga região no interior do tubo de saída de gás, sendo que para o escoamento mais diluído, essa região se estende até pouco abaixo do início da seção cônica do ciclone. Ratifica-se ainda a observação de que a reversão do escoamento se dá mais rapidamente à medida que se aumenta a concentração de alimentação de particulados.

Pela inspeção da Figura 5.4, na qual os mapeamentos dos campos de pressão são apresentados, percebe-se a intrínseca relação entre a região de baixa pressão e a reversão do escoamento. Enquanto a região de baixa pressão (cor azul escuro) se estende ao longo de todo o ciclone no escoamento monofásico, ou seja, a reversão do escoamento se dá próxima à entrada do coletor de sólidos, no escoamento bifásico, a região de baixa pressão tende a se localizar apenas na região interna do tubo de saída de gás, exatamente na região da velocidade máxima.

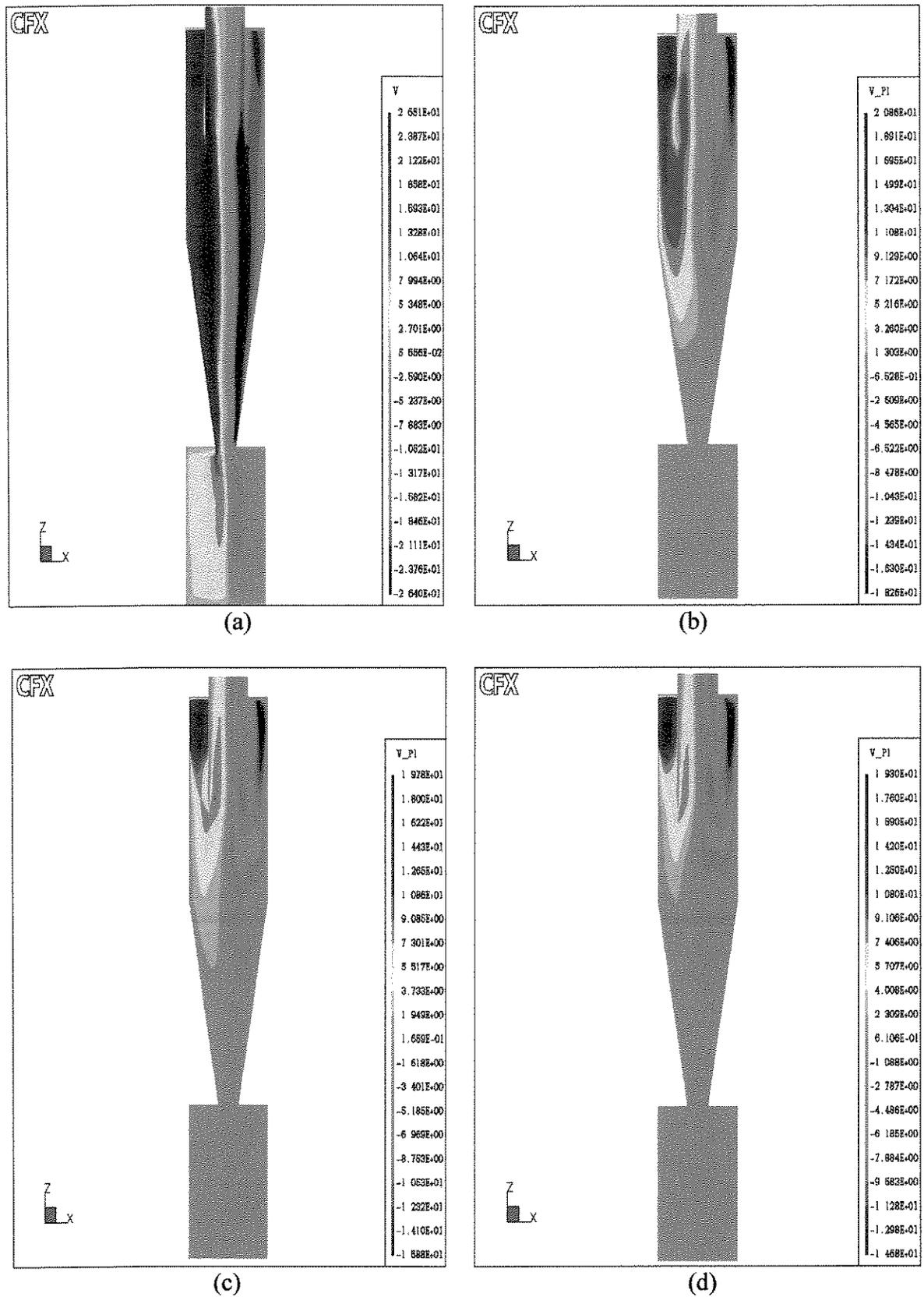


Figura 5.2 - Mapeamentos da velocidade tangencial da fase gás no ciclone:

(a) gás; (b)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (d)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$ .

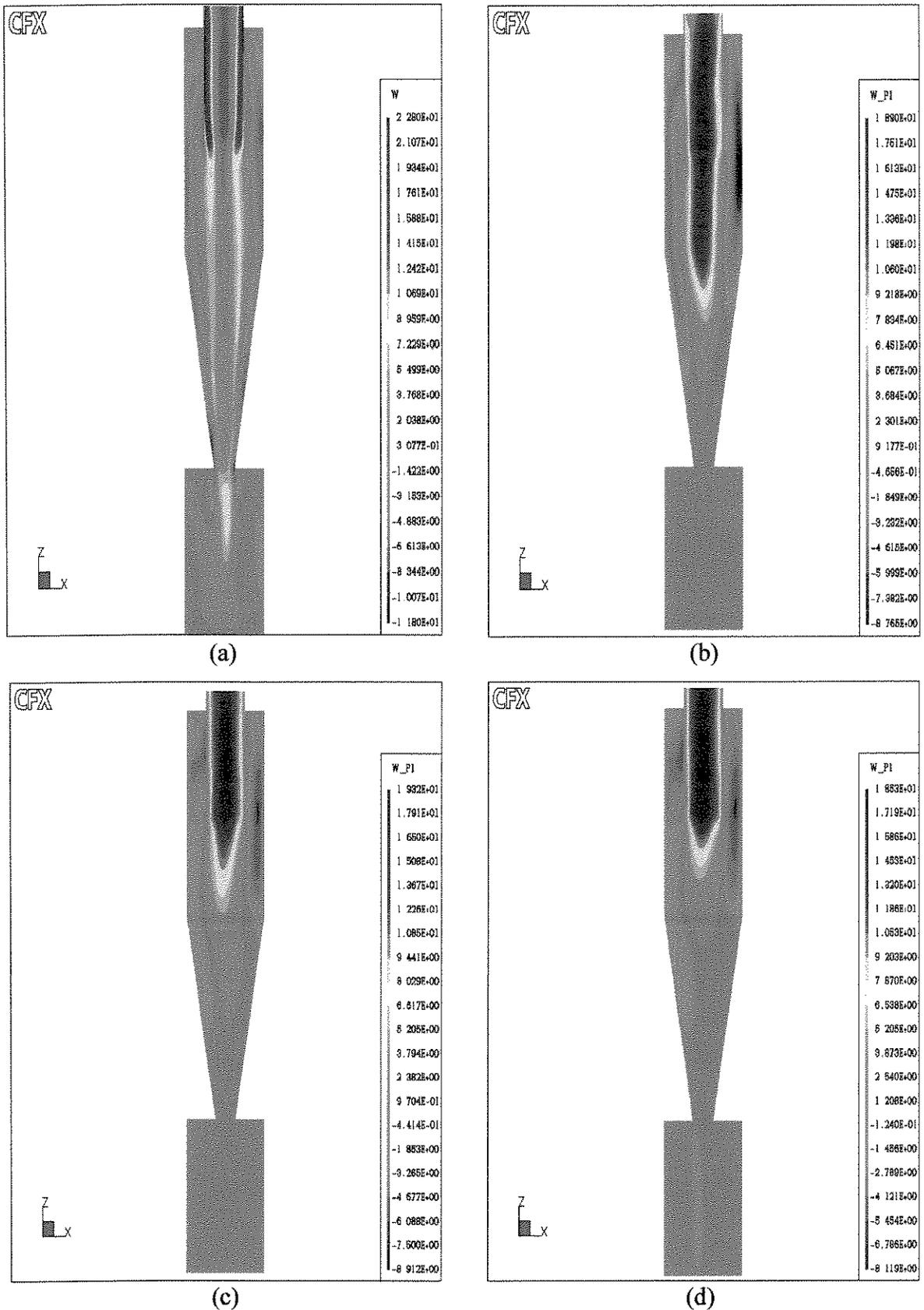


Figura 5.3 - Mapeamentos da velocidade axial da fase gás no ciclone:

(a) gás; (b)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (d)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$ .

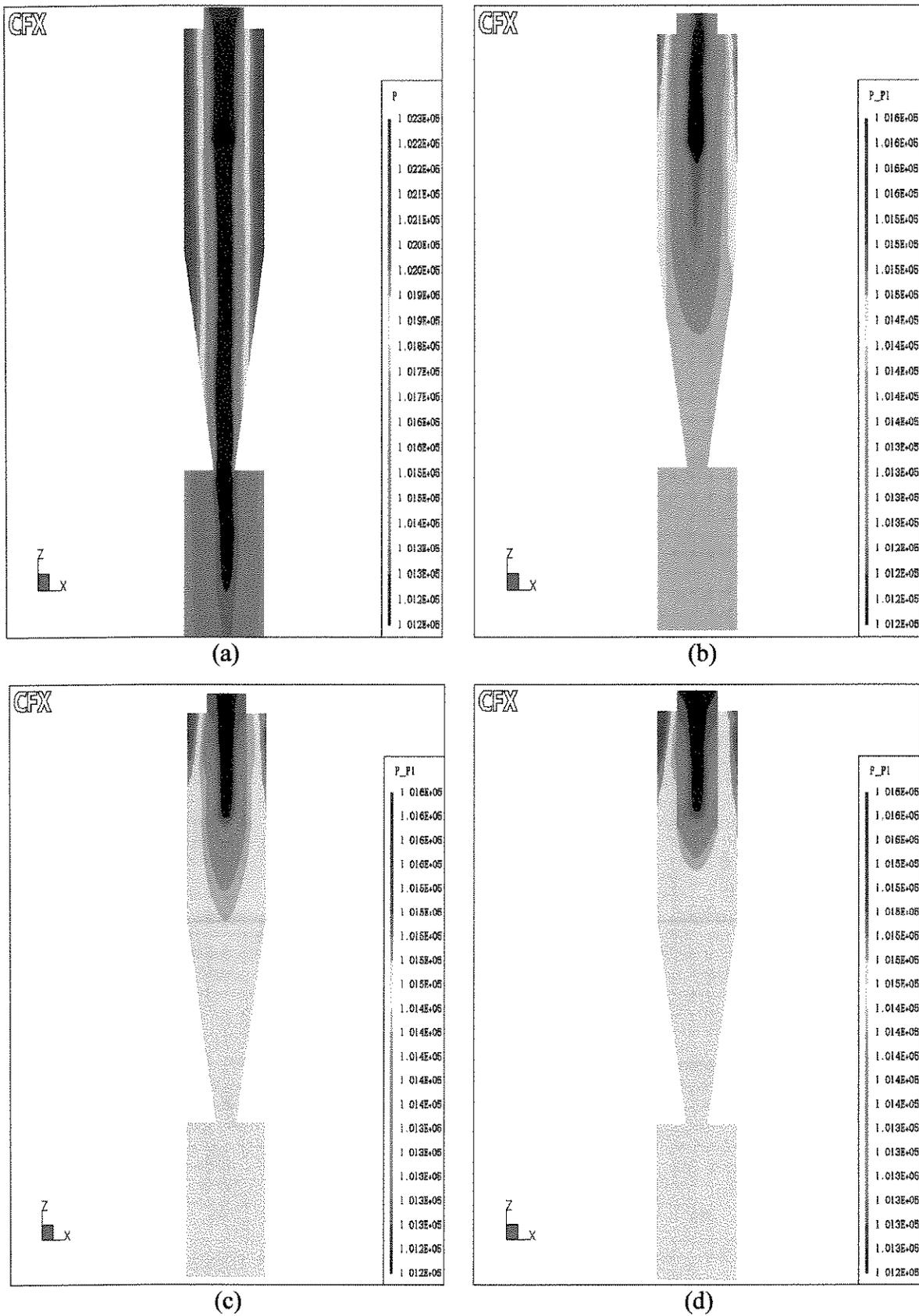


Figura 5.4 - Mapeamentos do campo de pressão da fase gás no ciclone:

(a) gás; (b)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (d)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$ .

As seqüências apresentadas nas Figuras 5.5 a 5.9 permitem visualizar como se dá o desenvolvimento do escoamento da fase particulada ao longo do tempo no ciclone, além dos efeitos de sua presença nos campos de velocidade e pressão da fase gasosa. Constata-se que o escoamento predominante da fase particulada ocorre junto às paredes do equipamento, como observado experimentalmente em diversos trabalhos da literatura.

Sabe-se que o comportamento da fase particulada observado no interior ciclônico é decorrente do balanço de forças entre a força centrífuga do escoamento gasoso, a qual move as partículas para as paredes do ciclone para serem depois coletadas e a força de arraste, a qual tende a atrair as partículas para o escoamento giratório e devido ao pequeno diâmetro das partículas (10  $\mu\text{m}$ ), a tendência é que ocorra o arraste das partículas para o fluxo ascendente de gás, em direção ao tubo de saída de gás, resultando na queda da eficiência de coleta.

Percebe-se, pela inspeção das Figuras 5.5 a 5.8, que com o aumento da concentração volumétrica de sólidos ocorre menor recirculação de partículas na região próxima ao coletor de sólidos, isto é, diminui o tempo de residência das partículas no ciclone. Este comportamento pode ser justificado pelo fato de ao se aumentar a concentração de sólidos junto à periferia do ciclone, diminui-se a componente tangencial da corrente gasosa e em consequência, a ação da força centrífuga que prende as partículas à parede, acarretando a diminuição do tempo de residência das partículas no ciclone, corroborando as observações experimentais feitas por MORI et al. (1969), YEN et al. (1990), CREMASCO (1994) e PERES (1997), entre outros.

Em decorrência da diminuição do tempo de residência das partículas no ciclone com o aumento da concentração volumétrica de sólidos, verifica-se maior eficiência de coleta para razão de alimentação de sólidos de 79,4  $\text{g}/\text{m}^3$  do que para a razão de alimentação de 5,4  $\text{g}/\text{m}^3$ , por exemplo, como já demonstrado na Tabela 5.2.

É importante notar também que uma parcela das partículas são arrastadas pela corrente gasosa em direção à parede externa do tubo de saída de gás. Observa-se que essas partículas deslizam pela parede do tubo e acabam sendo arrastadas pela corrente ascendente de gás, sendo portanto não coletadas, acarretando a diminuição da eficiência de coleta do ciclone.

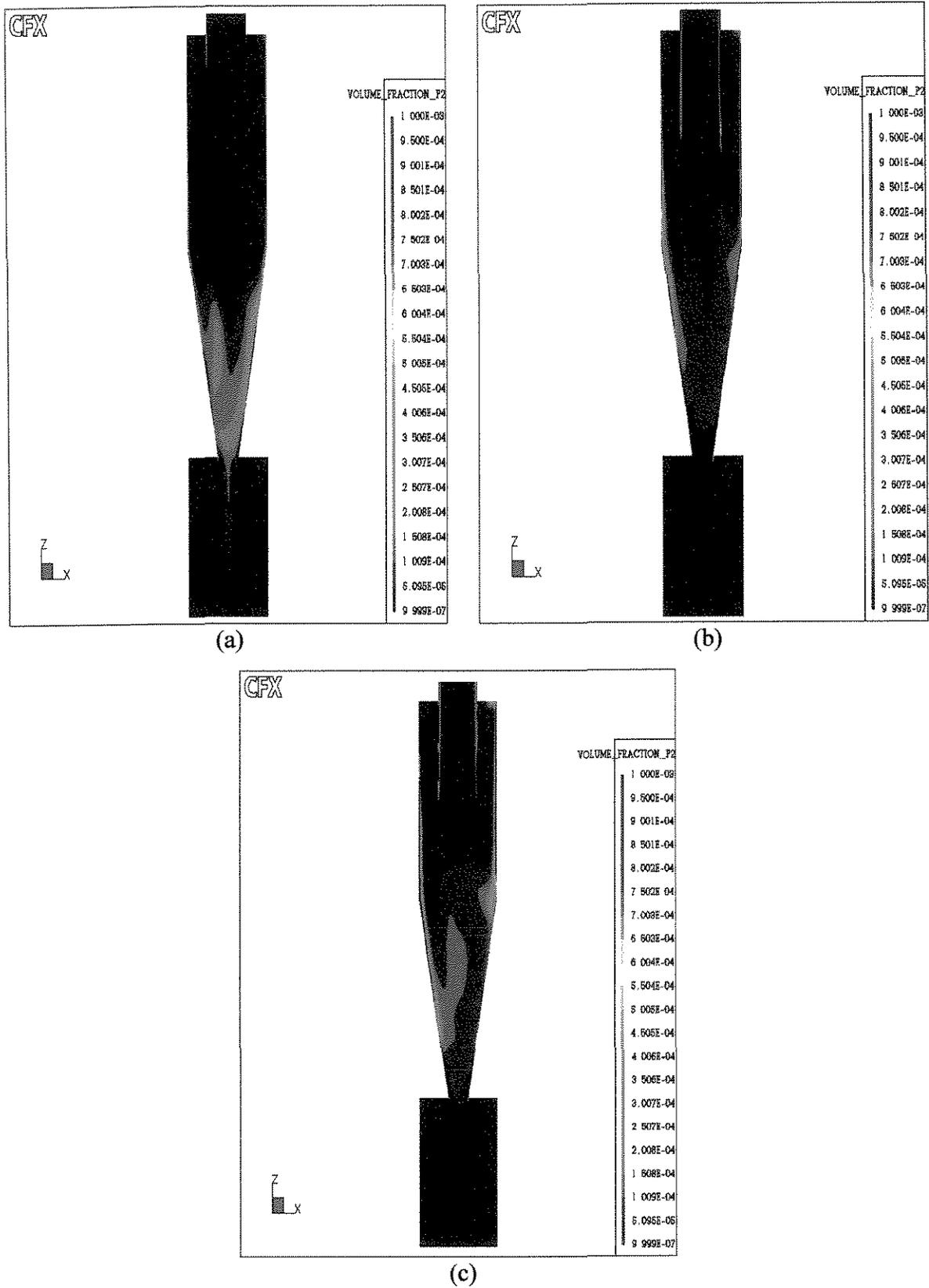


Figura 5.5 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 3s.

(a)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$

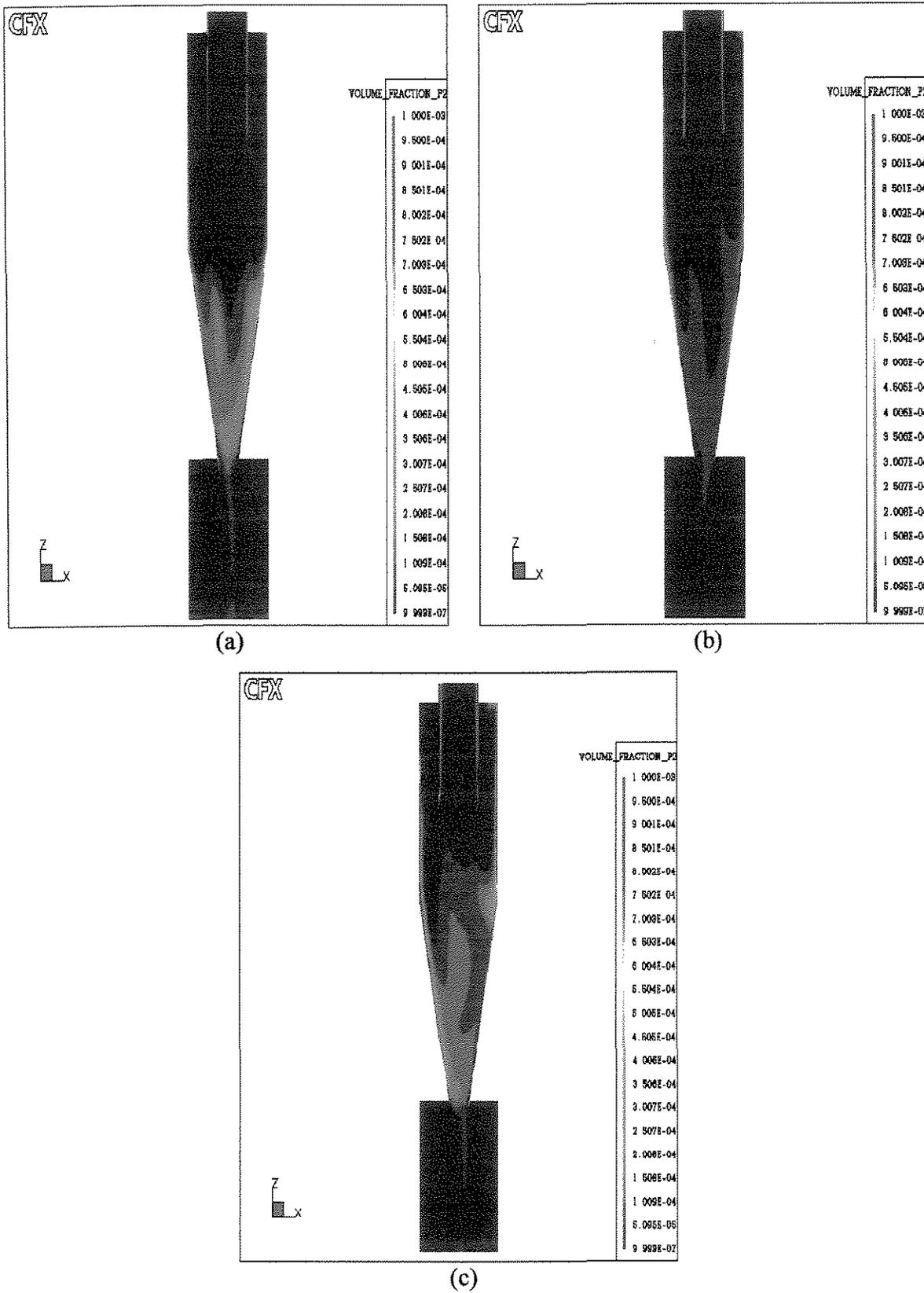


Figura 5.6 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 6s.

(a)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$

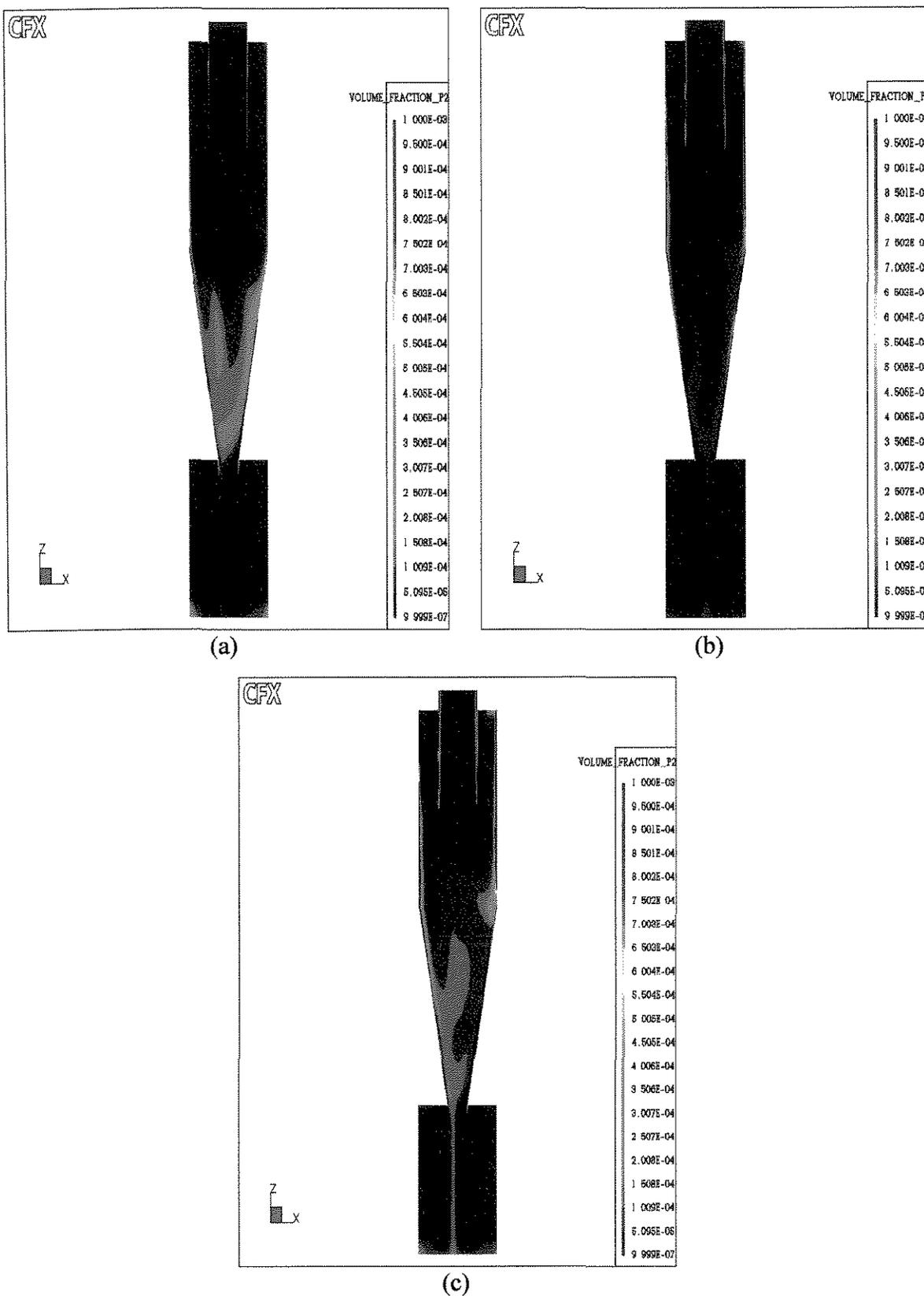


Figura 5.7 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 9s.

(a)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$

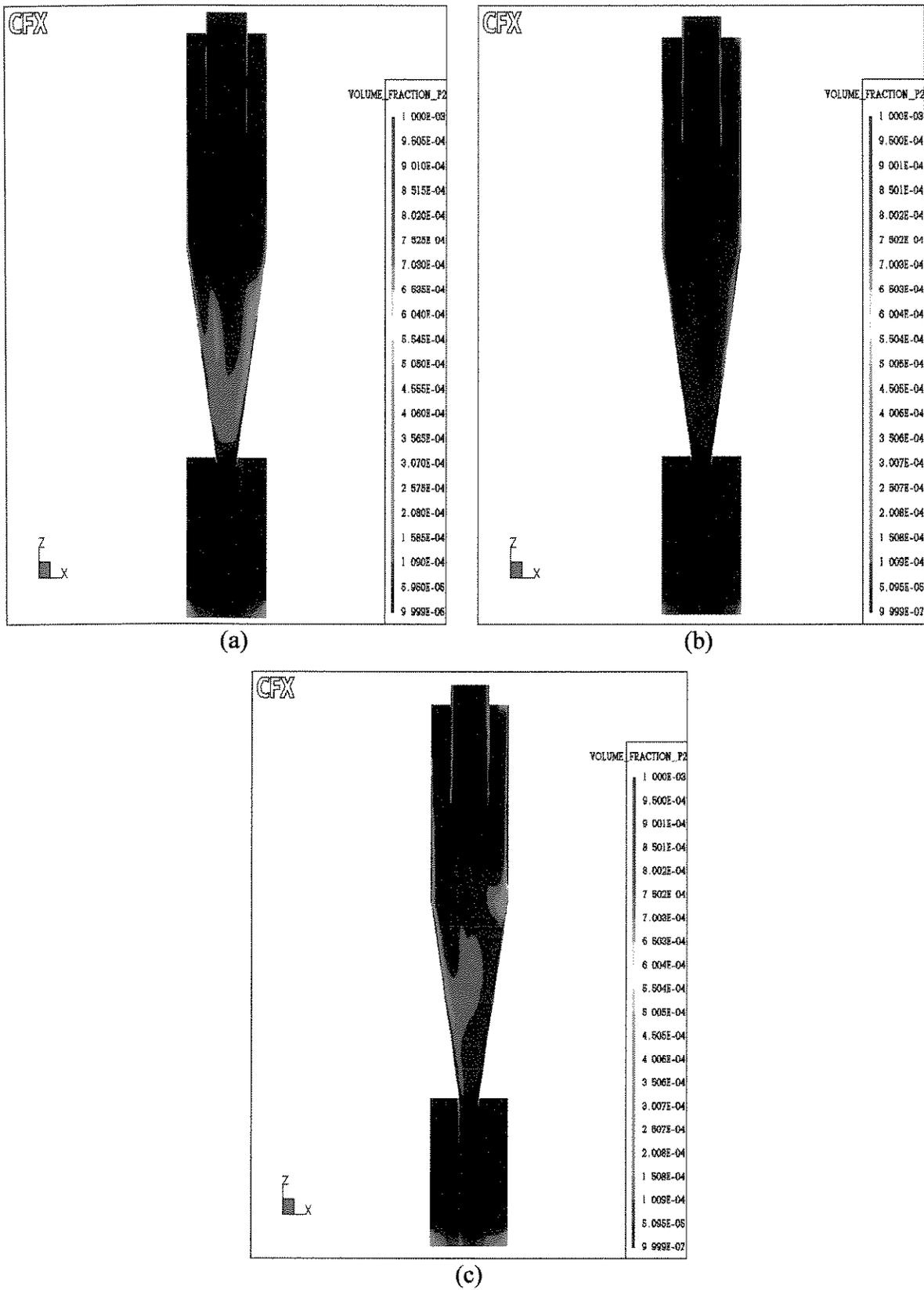


Figura 5.8 – Mapeamentos da fração volumétrica da fase particulada após 12s.

(a)  $q_p = 5,4 \text{ g/m}^3$ ; (b)  $q_p = 44,2 \text{ g/m}^3$ ; (c)  $q_p = 79,7 \text{ g/m}^3$

### 5.3. Estudo de Caso 8 – Ciclone industrial I

Neste tópico são apresentados os resultados numéricos da predição do escoamento gás-particulados em um ciclone industrial, com entrada em voluta, cuja configuração é bastante empregada na indústria de cimento. Os resultados numéricos da predição do escoamento do gás para este ciclone foram apresentados no Caso 5 do Capítulo 4.

As simulações do escoamento gás-particulados foram efetuadas adotando-se a mesma estratégia de solução do Caso 7, com um maior tempo real (da ordem de 44 segundos), para que se tenha melhor compreensão dos fenômenos envolvidos em escala industrial. As condições operacionais são apresentadas na Tabela 5.3 e reproduzem condições típicas usadas em uma indústria de cimento.

As distribuições radiais da velocidade tangencial do gás, com e sem a presença de particulados, em quatro alturas ao longo do ciclone, são apresentadas nas Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, mostrando a influência da fase particulada sobre a distribuição da velocidade tangencial do gás.

Com o intuito de melhor compreender a influência da fase particulada no escoamento, as Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial, velocidade axial e pressão, ao longo de todo o ciclone, comparando-se o escoamento somente do gás e do gás com a presença de particulados, após 44 segundos de tempo real.

Tabela 5.3 – Condições Operacionais – Caso 8.

Propriedades		
fase gás (ar)	velocidade de entrada (m/s)	15,8
	massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	0,3551
	viscosidade (kg/ms)	1,90.10 <sup>-5</sup>
fase particulada	diâmetro médio (µm)	26,0
	velocidade de entrada (m/s)	15,8
	massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	2740
	razão de carga (g/m <sup>3</sup> )	270
	Concentração volumétrica	5,5.10 <sup>-5</sup>

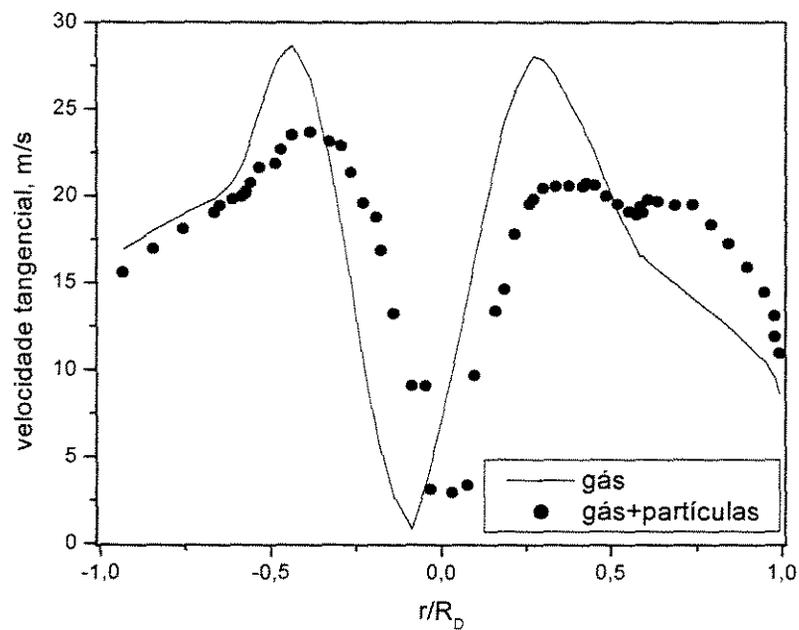


Figura 5.9 – Distribuições da velocidade tangencial (ponto 1) – Caso 8.

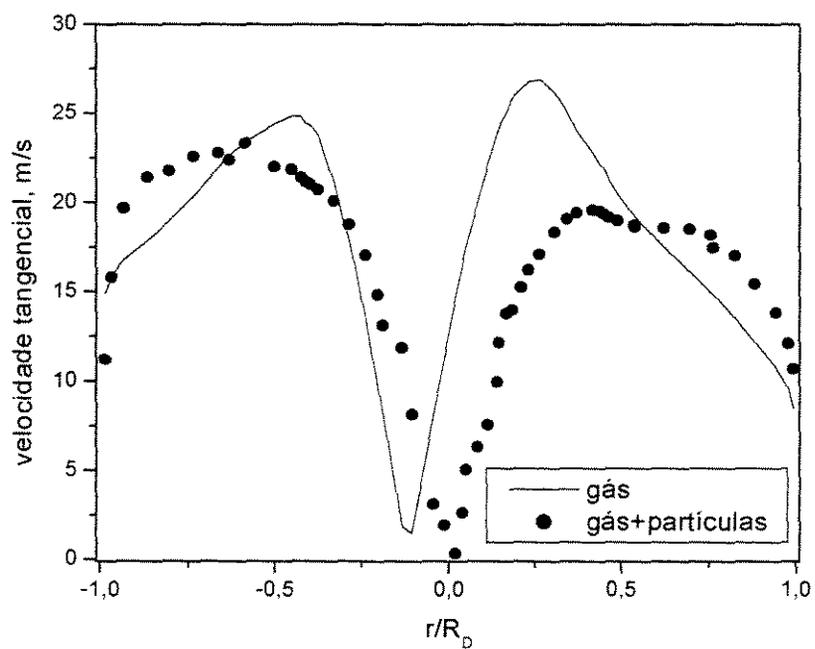


Figura 5.10 – Distribuições da velocidade tangencial (ponto 2) – Caso 8.

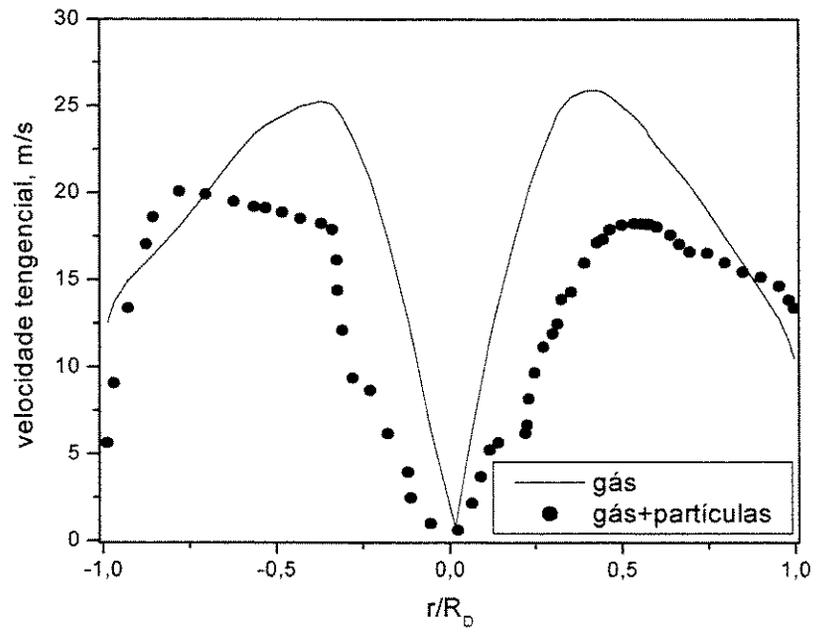


Figura 5.11 - Distribuições da velocidade tangencial (ponto 3) – Caso 8.

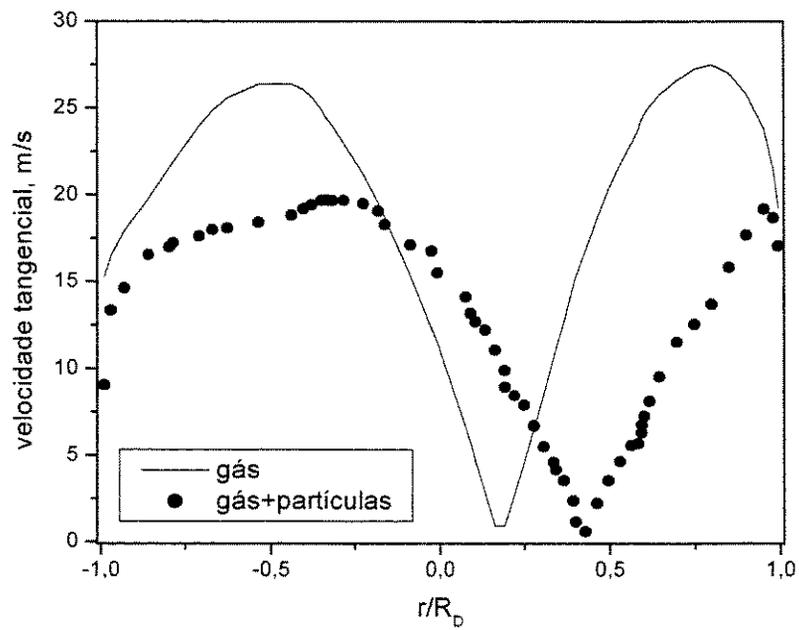


Figura 5.12 - Distribuições da velocidade tangencial (ponto 4) – Caso 8.

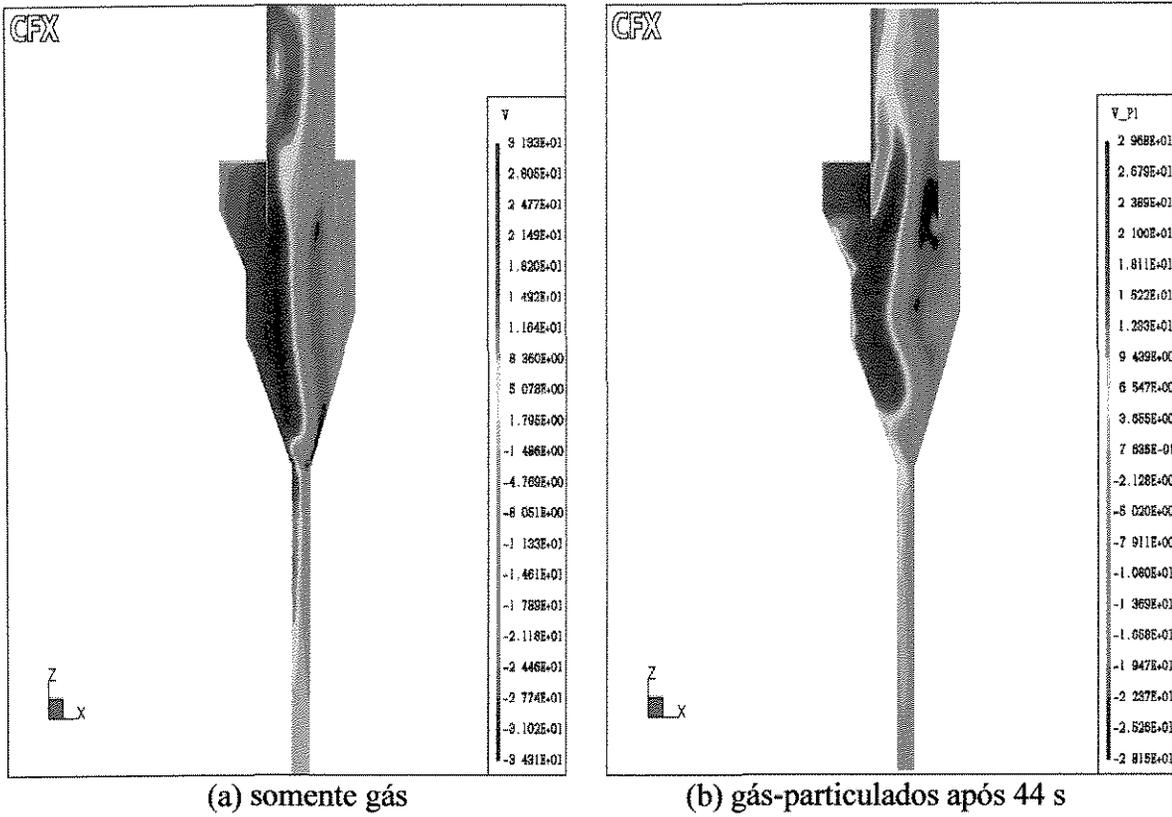


Figura 5.13 – Mapeamentos dos campos de velocidade tangencial – Caso 8.

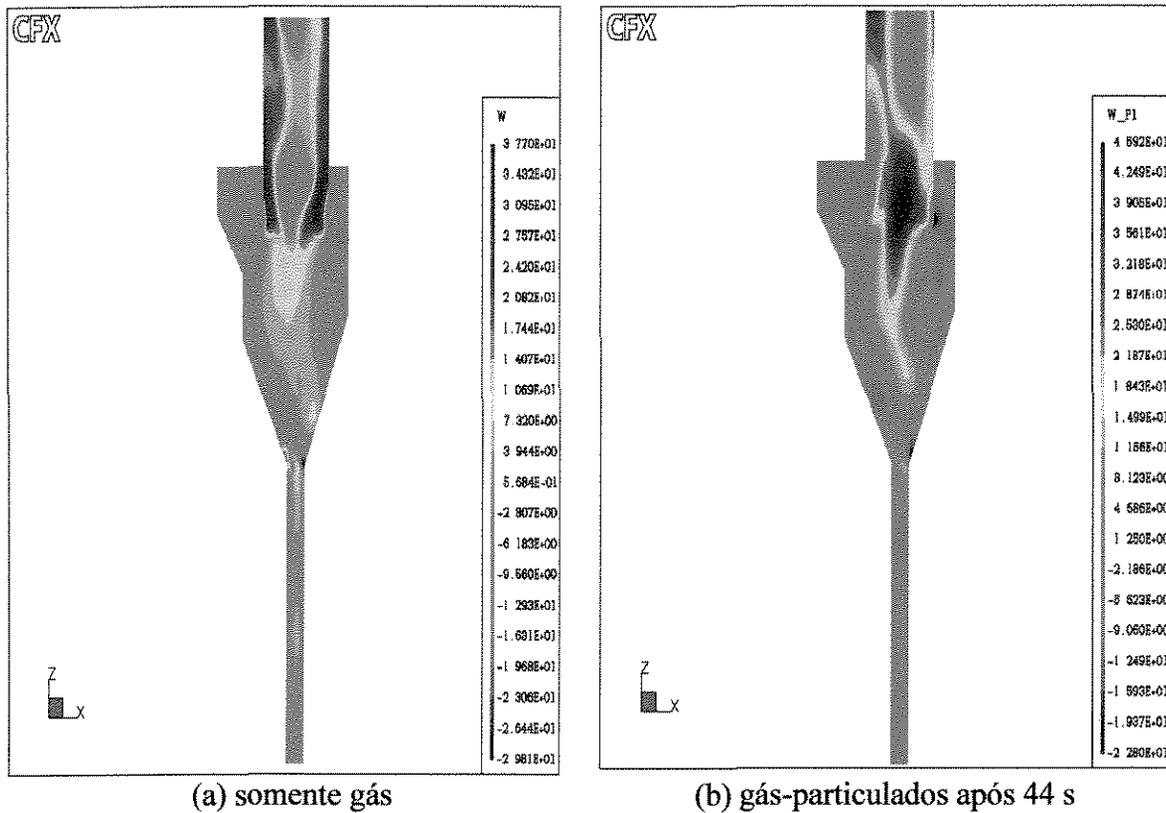


Figura 5.14 – Mapeamentos dos campos de velocidade axial – Caso 8.

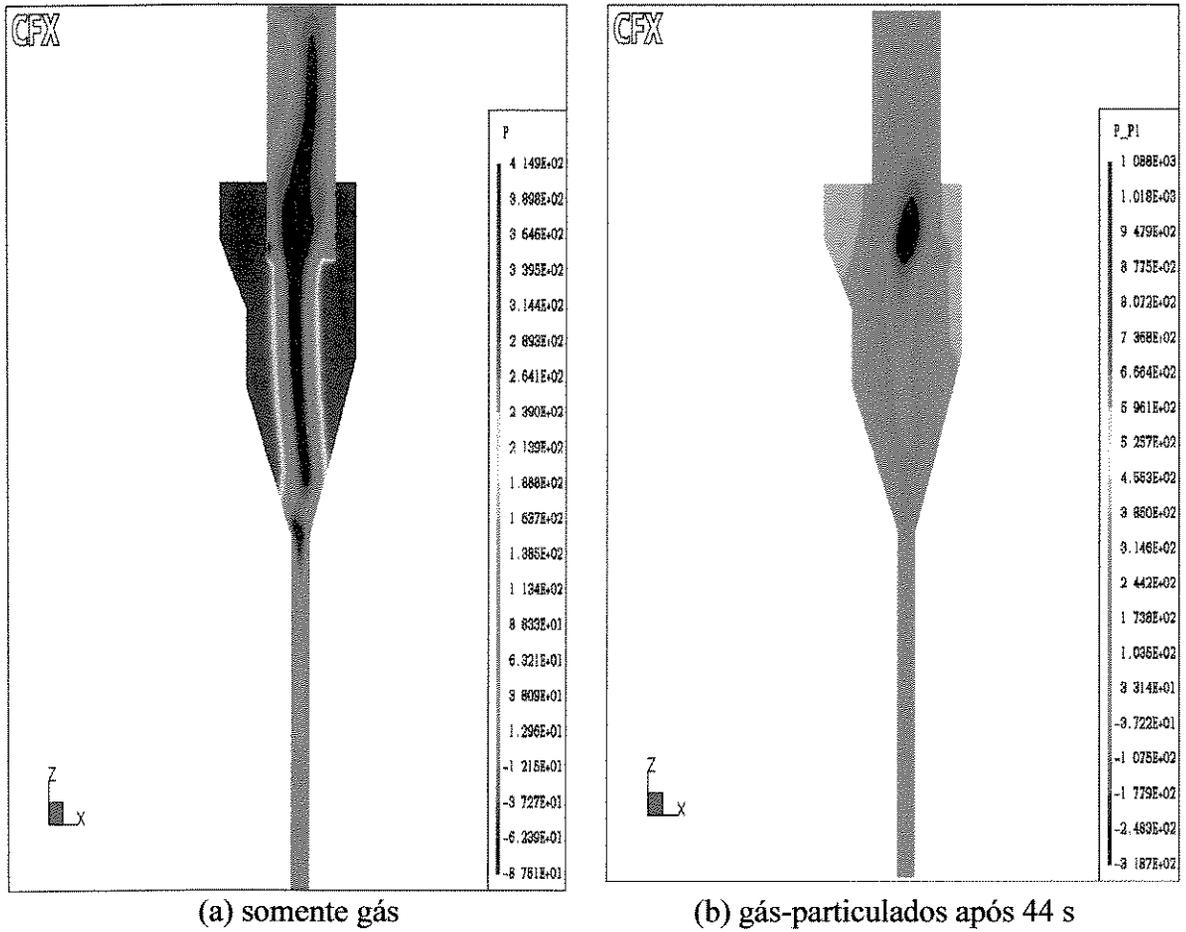


Figura 5.15 – Mapeamentos dos campos de pressão – Caso 8.

Observa-se, por inspeção das figuras de distribuição da velocidade tangencial (Figuras 5.9 a 5.12), que ocorre a diminuição dos picos de velocidade nos quatro pontos ao longo do ciclone em que os resultados numéricos foram comparados. A análise destas figuras, em conjunto com a Figura 5.13, a qual apresenta os mapeamentos dos campos de velocidade tangencial ao longo do equipamento, indica que a concentração de alimentação de sólidos utilizada altera significativamente os campos de velocidade tangencial no interior ciclônico após 44 segundos de tempo real, indo de encontro com os resultados obtidos para o ciclone do Caso 7.

Este comportamento encontrado para o Caso 8, semelhante ao Caso 7, permite extrapolar as observações feitas para um ciclone de pequenas dimensões como o do Caso 7 para um ciclone de escala industrial, portanto de grandes dimensões, sendo assim, a concentração de sólidos junto à periferia ciclônica exerce significativa influência nos campos de velocidade tangencial, alterando por conseguinte o escoamento do gás.

Pela análise da Figura 5.14, na qual os mapeamentos dos campos de velocidade axial do gás são comparados, constata-se que a velocidade axial é alta junto às paredes do tubo de saída do gás, bem como na região central próxima à entrada do tubo de saída de gás, onde são observados os picos da velocidade axial, comportamento próximo ao observado para o Caso 7.

A Figura 5.15 apresenta os mapeamentos dos campos de pressão, onde é corroborada a relação entre a região de baixa pressão e a reversão do escoamento do gás, ou seja, verifica-se que a região de menor pressão se encontra no interior do tubo de saída do gás. Pelo fato da reversão do escoamento do gás ocorrer em regiões próximas à entrada do coletor de sólidos, há uma estreita região de baixa pressão próxima ao eixo de simetria do equipamento ao longo de todo o ciclone.

Os resultados numéricos obtidos para os parâmetros globais de queda de pressão e eficiência de coleta do ciclone, para a razão de carga de  $270 \text{ g/m}^3$  e diâmetro médio das partículas de  $26,0 \text{ }\mu\text{m}$ , são mostrados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Resultados numéricos de queda de pressão e eficiência de coleta – Caso 8.

$\Delta P$ (Pa)	420
Efic (%)	53,0

Os resultados mostram que há uma diminuição da queda de pressão devida à presença da fase particulada, já que para o escoamento somente do gás a queda de pressão observada é da ordem de 500 Pa. Dados experimentais tanto de queda de pressão quanto de eficiência de coleta não são ainda disponíveis. No entanto, MEIER et al. (2002a,b) fizeram a simulação bidimensional deste mesmo ciclone industrial, utilizando o código computacional CICLO desenvolvido por MEIER (1998), como discutido no Capítulo 2. Importantes informações sobre o desenvolvimento do escoamento da fase particulada podem ser extraídas deste trabalho, enquanto dados sobre queda de pressão não foram apresentados e analisados.

As seqüências apresentadas nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 têm o intuito de mostrar como se dá o desenvolvimento do escoamento da fase particulada ao longo do tempo, bem como os efeitos de sua presença nos campos de velocidade e pressão da fase gasosa.

O escoamento da fase particulada ocorre predominantemente junto às paredes do ciclone, já que a tendência das partículas é se aglomerarem e escorregarem até o coletor de sólidos.

Nota-se também que uma parcela das partículas são arrastadas pela corrente gasosa em direção à parede externa do tubo de saída de gás. Essas partículas deslizam pela parede do tubo e acabam sendo arrastadas pela corrente ascendente de gás, não sendo coletadas, acarretando a diminuição da eficiência de coleta.

MEIER et al. (2002a,b) constataram a tendência do escoamento em atingir um estado estacionário periódico instável para partículas de diâmetro entre 15 e 25  $\mu\text{m}$ . A hipótese levantada é que este estado seja resultado do balanço de forças entre a força centrífuga que move as partículas para as paredes e a força de arraste que tende a atrair as partículas das paredes para o escoamento vorticial. Este comportamento também foi observado para o caso em questão, cujo diâmetro médio das partículas é de 26  $\mu\text{m}$ , como comprovam as Figuras 5.16, 5.17 e 5.18. De acordo com as observações feitas por MEIER et al. (2002a,b), a existência deste estado estacionário periódico instável é provavelmente responsável pelo fenômeno de avalanche de sólidos verificado no processo industrial. Ou seja, há um acúmulo de sólidos em certas região do ciclone próximo às paredes do ciclone, levando a uma posterior descarga repentina de sólidos, fechando-se um período de acúmulo de sólidos e iniciando-se outro.

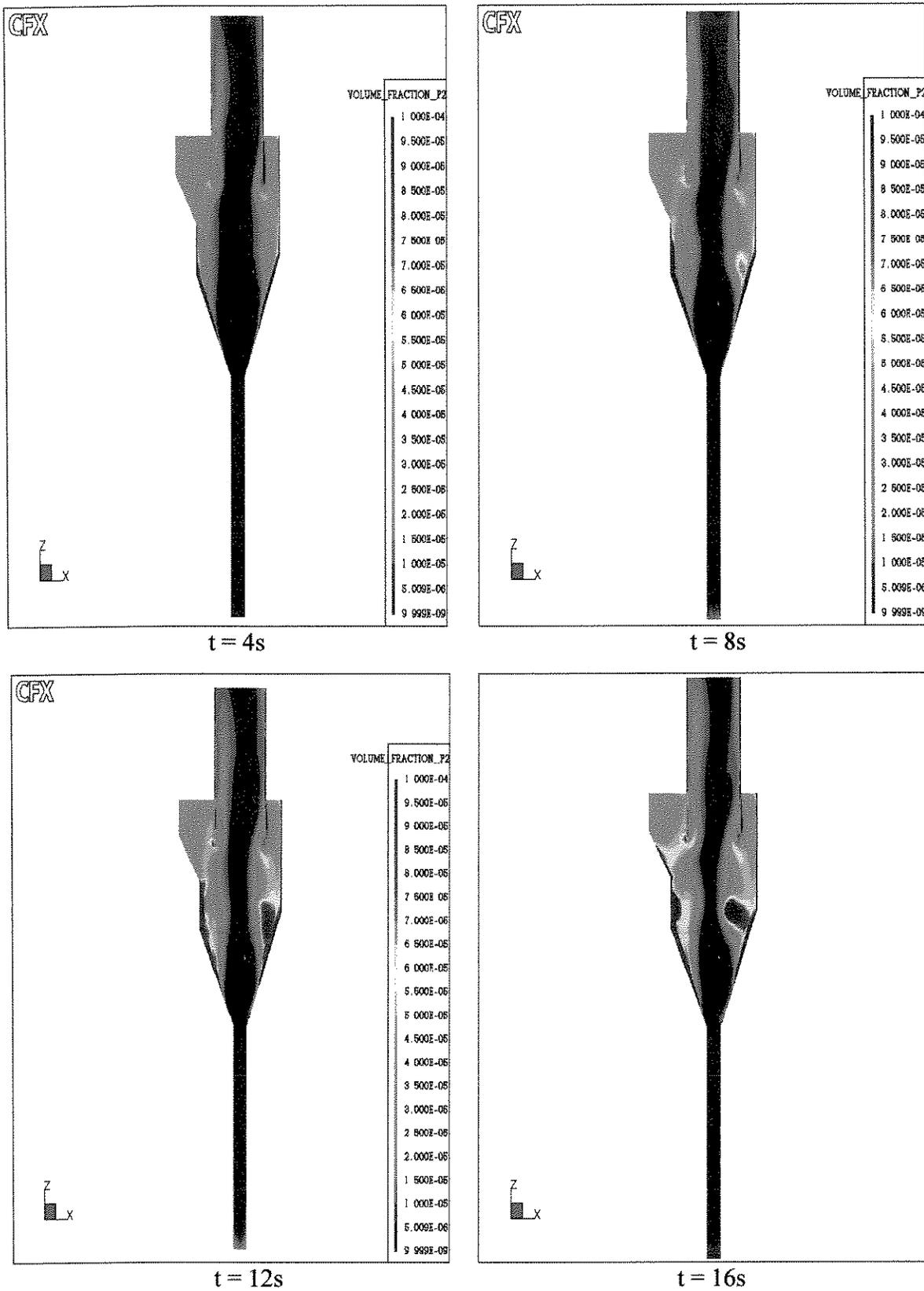


Figura 5.16 – Desenvolvimento do campo de fração volumétrica da fase particulada ao longo do tempo (4 a 16 s).

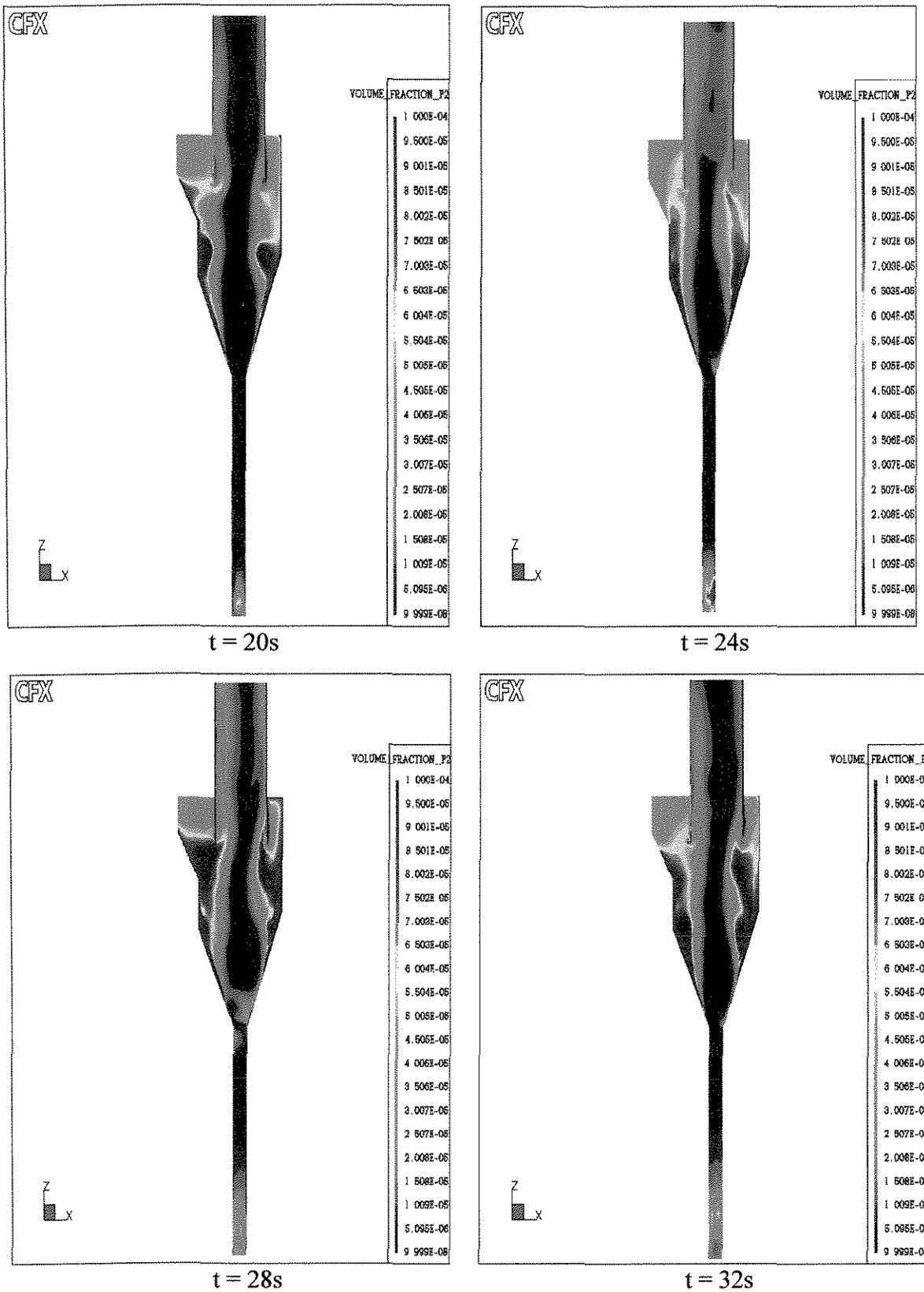


Figura 5.17 – Desenvolvimento do campo de fração volumétrica da fase particulada ao longo do tempo (20 a 32 s).

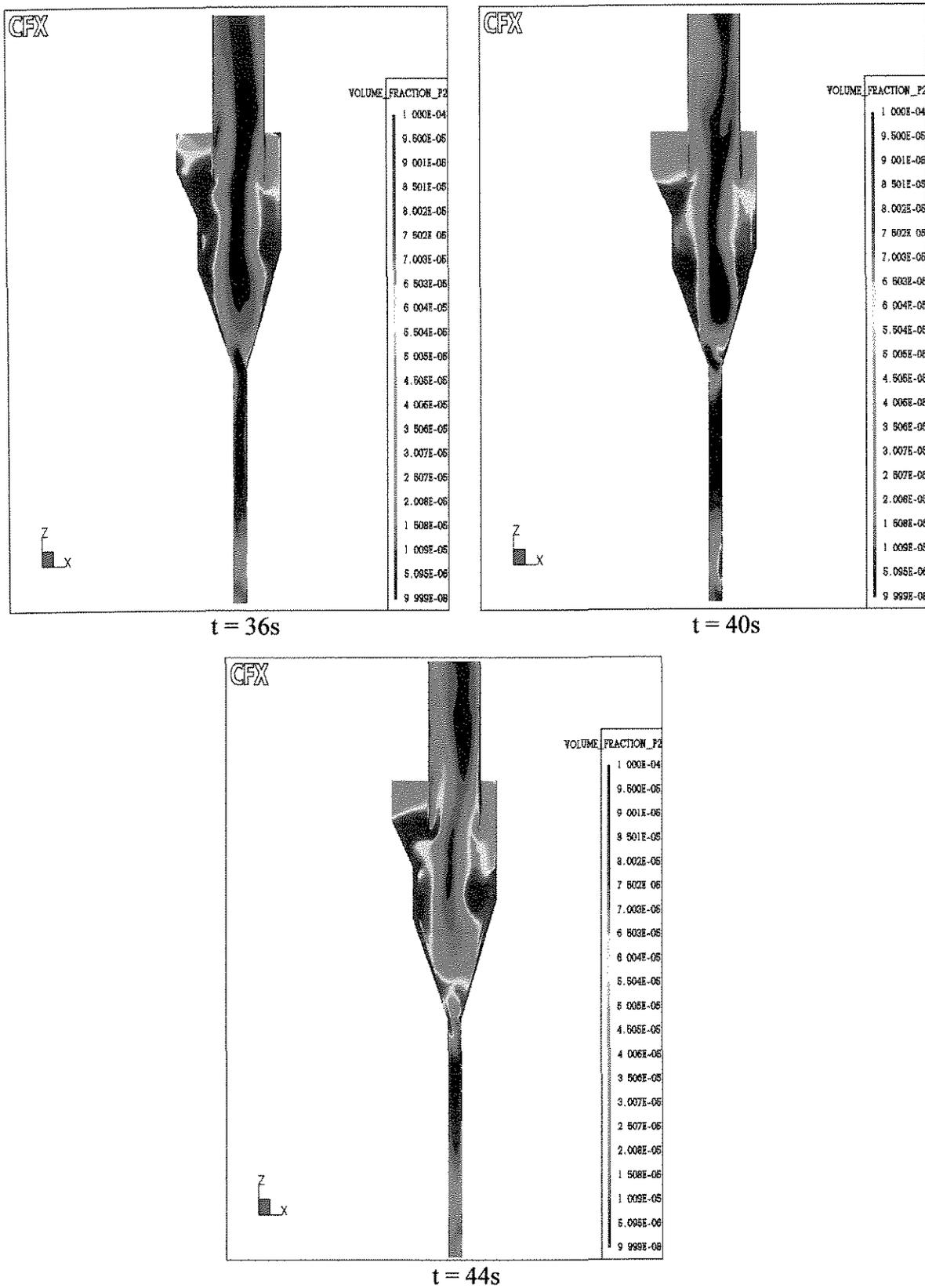


Figura 5.18 – Desenvolvimento do campo de fração volumétrica da fase particulada ao longo do tempo (36 a 44 s).

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 6.1. Conclusões Principais

As principais características do escoamento no interior ciclônico foram reproduzidas nas simulações computacionais pelo método dos volumes finitos desenvolvidas neste trabalho, por intermédio da utilização das técnicas de fluidodinâmica computacional.

Observou-se que o modelo de turbulência DSM em conjunto com um esquema de interpolação de alta ordem representa satisfatoriamente bem o escoamento giratório do gás em ciclones, tanto qualitativamente como quantitativamente, quando confrontados os resultados numéricos com os experimentais.

Constatou-se também que à medida que os recursos computacionais avançam, simulações de escoamentos complexos como o encontrado em ciclones podem ser realizadas requerendo-se menores tempos de CPU.

A boa representação do escoamento do gás no interior ciclônico, quando comparada com dados experimentais, tornou possível a simulação de ciclones industriais de grandes dimensões, como objetivava-se neste trabalho, alcançando-se êxito.

O avanço destes recursos possibilitou inclusive a simulação tridimensional do escoamento bifásico (gás-particulados), indo além dos objetivos iniciais deste trabalho,

embora o tempo requerido para a solução de todas as equações envolvidas, para esta versão do código computacional, seja ainda bastante elevado.

A simulação do escoamento bifásico em ciclones permitiu verificar a importante influência que a fase particulada exerce sobre a fluidodinâmica do escoamento do gás, corroborando observações experimentais. Fenômenos específicos de determinadas condições operacionais, como o fenômeno da avalanche detectado em ciclones utilizados na indústria de cimento, o qual leva a descargas periódicas e repentinas de sólidos, foram reproduzidos nas simulações. Conclui-se que modificações geométricas visando a melhora de performance dos ciclones podem ser obtidas por intermédio das técnicas de fluidodinâmica computacional.

## **6.2. Sugestões para Futuros Trabalhos**

O bom desempenho dos ciclones é de vital importância para a qualidade do produto de fundo da unidade fracionadora, pela redução do teor de cinzas, e no aspecto ambiental, pela redução das emissões de partículas para o meio ambiente.

Os resultados finais permitirão acrescentar o desempenho e a eficiência global dos ciclones das unidades de FCC. Este é um fator importante a ser considerado, pois, devido à competitividade dos derivados de petróleo produzidos pela indústria nacional, induzida pela globalização, sabe-se que qualquer incremento de performance de ciclones apresenta uma economia de milhões de dólares anuais.

Sugere-se aperfeiçoar os modelos de CFD para ciclones já existentes, bem como implementar novos modelos, de forma que estes traduzam com mais fidelidade os

fenômenos reais da influência da presença de particulados no escoamento do gás no interior ciclônico. Este objetivo fica mais factível graças ao constante aperfeiçoamento dos códigos de fluidodinâmica computacional e dos recursos computacionais disponíveis, os quais possibilitam a obtenção de resultados consistentes em menor tempo de CPU.

Dar continuidade aos estudos de CFD aplicada a escoamentos em ciclones, fornecendo subsídios para a elaboração de um modelo tridimensional com abordagem Euleriana-Euleriana-Lagrangeana, a qual leva em consideração a influência da fase particulada sobre a fase gasosa, além da predição da trajetória das partículas no interior do equipamento.

Realizar estudos sobre o tempo de residência dos sólidos no interior do ciclone, para se conhecer a influência deste parâmetro na eficiência de coleta.

Auferir, por meio da simulação numérica, resultados para os campos dos componentes de velocidades tangencial, axial e radial e pressão da fase gasosa, bem como a influência da fase particulada no escoamento da fase gasosa. Outrossim, resultados para a eficiência de coleta dos particulados finos e queda de pressão em função das configurações geométricas industriais devem ser determinados e alterações no projeto dos ciclones podem ser simuladas e testadas, visando a otimização dos processos.

Obter novos resultados experimentais por intermédio da instalação de um sistema de “Laser Doppler Velocimeter” (LDV), o qual viabilizará medidas experimentais para a obtenção de um levantamento completo de campos de velocidades, distribuições de pressão e frações volumétricas para as condições experimentais em ciclones. Isso permitirá complementar os trabalhos de pesquisa até agora realizados e a validação dos modelos de fluidodinâmica computacional (CFD).

Visa-se, destarte, contribuir com resultados mais próximos do real funcionamento dos ciclones. Com isto, será possível prever o comportamento destes equipamentos, controlando suas variáveis operacionais para que uma melhor performance seja alcançada.

Espera-se ainda, a curto prazo, a redução da geração de finos dentro dos ciclones, bem como o aumento da vida útil destes equipamentos.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ALEXANDER,R.M. Fundamentals of Cyclone Design and Operation. Proceedings of Australian Inst. Min. Metall., p.152-153, 1949.
- BARTH,W. Berechnung and Auslegung von Zyklonabscheidern auf Grund Neuerer Untersuchungen. Brenst, Waerme Kruft, v.8, p.1-9, 1956.
- BASKAKOV,A.P.; DOLGOV,V.N.; GOLDOBIN,Yu.,M. Aerodynamics and Heat Transfer of Cyclone with Particle Laden Gas, Proceedings of the International Conference on Circulating Fluidized Beds, v.1,p.106-113, Compiègne,França, 1988.
- BENTA,E.S. Estudo da Secagem de Sabugo de Milho em Ciclone. Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 122p., 1997.
- BOYSAN,F.; AYERS,W.H.; SWITHENBANK,J. A Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design. Trans.IchemE,v.60,p.222-230,1982.
- BÜRKHOLZ,A. Die Tropfenabscheidung in Zyklonen in Abhängigkeit von Gasdurchsatz, Druckverlust, Tropfengröße und Zyklonabmessungen. Manuskript Nr. Chemie-Ing.-Tech MS 1236, 1984.
- BÜTTNER,H. Size Separation of Particles from Aerosol Samples using Impactors and Cyclones. Part. & Part. Syst. Charact., v.5., p-87-93, 1998.

- BÜTTNER,H. Dimensionless Representation of Particle Separation Characteristic of Cyclones. J. Aerosol Science, v.30, n.10, p.1291-1302, 1999.
- CORRÊA,J.L.G.; GRAMINHO,D.R.; SILVA,M.A.; NEBRA,S.A. Cyclone as a Sugar Cane Bagasse Dryer. Proceedings of 13<sup>o</sup> International Drying Symposium (IDS 2002), p.1542-1549, Beijing, China, 2002.
- CREMASCO,M.A.; MOMPEAN DA CRUZ,G.M.; NEBRA,S.A. Experimental Study of the Gas-Wall Heat Transfer in Cyclones. Proceedings of the International Symposium on Heat and Mass Transfer in Energy Systems and Environmental Effects, v.1,Cancun,México, 1993.
- CREMASCO,M.A. Estudo sobre o Escoamento Ar/Partículas em um Reator Ciclônico. Tese de Doutorado, FEM/UNICAMP, Campinas, 182p., 1994.
- CRISTEA,E.D.; MALFA,E.; COGHE,A. 3-D Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln Preheater Top Cyclone. 1994 Fluent European User's Group Meeting, Reino Unido, 1994.
- CRISTEA,E.D.; MALFA,E.; COGHE,A. 3-D Numerical Simulation and Measurement of Strongly Swirling Heavy Dust-Laden Flow Inside a Cyclone Separator. 3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Engineering Turbulence Modeling and Measurements, p.851-860, Grécia, 1996.
- 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, 7pp., Washington, USA, 1998.

- DIETZ,P.W. Collection Efficiency of Cyclone Separators. A.I.Ch.E. Journal, v.27, p.285-289, 1981.
- DUGGINS,R.K.; FRITH,P.C.W. Turbulence Anisotropy in Cyclones, Filtration & Separation, p.394-397, Nov/Dec, 1987.
- DYAKOWSKI,T.; WILLIAMS,R.A. Modeling Turbulent Flow Within a Small-Diameter Hydrocyclone, Chem. Eng. Science,v.48,n.6,p.1143-1152,1993.
- FOX,R.W.; MCDONALD,A.T Introdução à Mecânica dos Fluidos. Editora Guanabara Dois, 2ªed., 1981.
- FROLOV,V.F. Modelling of Drying of Dispersed Materials, Kymia, Leningrad. (em russo),1987 apud SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. Simulação de Transferência de Calor em Ciclone. Anais do XXII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos (XXII ENEMP), v.1, p.251, Florianópolis, 1994.
- FUDIHARA,T.J. Método dos Volumes Finitos Aplicado à Modelagem Matemática e Simulação Computacional de um Forno aquecido por um Jato de Chama com Escoamento em Vórtice. Tese de Doutorado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 165p., 2000.
- GIDASPOW,D. Multiphase Flow and Fluidization Continuum and Kinetic Theory Descriptions. Academic Press, 465p., 1994.
- GRIFFITHS,W.D.; BOYSAN,F. CFD and Empirical Modelling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers. J. Aerosol Science, v.98, p.281-304, 1996.

- GROTJANS,H. Application of Higher Order Turbulence Models to Cyclone Flows. Zyklonabscheider in der Energie und Verfahrenstechnik, Fachtatung Leverkusen, VDI-Verlag, VDI-Berichte, p.175, 1999.
- 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.; de GROOT,M.; HOSPERS,A. The Effect of the Dust Collection System on the Flow Pattern and Separation Efficiency of a Gas Cyclone. Canadian J. Chem. Eng., v.74, p.464-470, 1996.
- IOZIA,D.L.; LEITH,D. The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency. Aerosol Science and Technology, v.12, p.598-606, 1990.
- KAUFF,D.A; BARTHOLIC,D.B.; STEVES,C.A.; KEIM,M.R. Successful Application of the MSCC Process. Hydrocarbon Engineering, p.51-62, 1996.
- KIM,J.C.; LEE,K.W. Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones. Aerosol Sci. Tech. v.12, 1003-1015, 1990.
- KIM,H.T.; LEE,K.W.; KUHLMAN,M.R. Exploratory Design Modifications for Enhancing Cyclone Performance. J. Aerosol Science, v.32, p.1135-1146, 2001.
- KLUCOVSKY,P., HASPRA,J.; DUKYJ, J. A Cyclone as a Heat Exchanger, International Chemical Engineering,v.2,n.2,p.279-282,1962.
- LAPPLE,C.E. Gravity and Centrifugal Separation. Industrial Hygiene Quarterly, v.11, p.40-48, 1950.

LEITH,D.; LICHT,W. The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors: A New Theoretical Approach. A.I.Ch.E. Symposium Series, v.68, p.196-206, 1972.

LIXING,Z. Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion. CRC Press, 1993.

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 (9), p.1097-1119, 2000.

MADSEN,H.J.; THORSTENSEN,J.H.; SALIMI,P.; HASSING,N.H.; RUSAAS,J. Prediction of the Performance of Gas Cyclones, 2<sup>nd</sup> CFDS International User Conference,1994.

MALISKA,C.R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas, FTC Editora, 424p., 1995.

MANUAL DO CFX, Solver, AEA Technology, 2001.

MEIER,H.F.; MORI,M. Modeling and Simulation of the Turbulent Gas Flow in a Cyclone Separator, Actas del 3er Congreso Interamericanp de Computacion Aplicada a la Industria de Procesos, Cordoba, Argentina, p.193-198, 1996.

MEIER,H.F.; MORI,M. Computacional Fluid Dynamics Techniques for Gas Flow in Cyclones, 4<sup>th</sup> CFX International Users Conference,Chicago-USA,1997.

MEIER,H.F. Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional. Tese de Doutorado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 210p., 1998.

- MEIER,H.F.; MORI,M. Gas Solid Flow in Cyclones. The Eurlian-Eurlian Approach, Computers and Chemical Engineering, p.S641-S644, 1998.
- MEIER,H.F.; ALVES,J.J.N.; MORI,M. Comparison between Staggered and Colocated Grids in the Finite-Volume Method Performance for Single and Two Phase Flows. Computers and Chemical Engineering, 1998.
- MEIER,H.F.; MORI,M. Anisotropic Behavior of the Reynolds Stress in Gas and Gas-Solid Flow in Cyclones. Powder Technology, v.101, p.108-119, 1999.
- MEIER,H.F.; KASPER,F.R.S.; PERES,A.P.; HUZIWARA,W.K.; MORI,M. Comparison Between Turbulence Models for 3-D Turbulent Flows in Cyclones. Proceedings of XXI CILAMCE, 18p., Rio de Janeiro, Brasil, 2000.
- MEIER,H.F.; ROPELATO,K.; MORI,M.; IESS,J.J.; FORSTER,H. Computational Fluid Dynamics (CFD) und Auslegung von Zyklonen, Teil I. ZKG International, v.55, n.4, p.64-75, 2002a.
- MEIER,H.F.; ROPELATO,K.; MORI,M.; IESS,J.J.; FORSTER,H. Computational Fluid Dynamics (CFD) und Auslegung von Zyklonen, Teil II. ZKG International, v.55, n.6, p.58-64, 2002b.
- MEISSNER,P.; LOFFLER,F. Zur Berechnung des Stromungsfeldes im Zyklonabscheider. Chem. Ing. Tech., v.50(6), p.471, 1972.
- MONTAVON,C.A.; GROTTJAN,H.; HAMILL,I.S.; PHILLIPS,H.W.; JONES,I.P. Mathematical Modelling and Experimental Validation of Flow in a Cyclone, BHR Conference on Cyclone Technologies, 12p., 2000.

- MOREIRA, D.R.R. Simulação Não Isotérmica de um Regenerador usando a Fluido Dinâmica Computacional. Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 92p., 2002.
- MORI, T.; SUGANUMA, A.; TANAKA, S. On Collection Efficiency of Gas Cyclone in Coarse Particle Range. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.1, n.1, p.82, 1969.
- MOTHES, H.; LÖFFLER, F. Bewegung and Abscheidung der Partikeln in Zyklon. *Chemie-Ing.- Tech MS 1267*, 1984.
- NEBRA, S.A. Secagem Pneumática de Bagaço de Cana. Tese de Doutorado, FEC/UNICAMP, Campinas, 121p., 1985.
- 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, n.1-3, 2000
- OGAWA, A. Estimation of the Collection Efficiencies of the Three Types of the Cyclone Dust from the Standpoint of the Flow Patterns in the Cylindrical Cyclone Dust Collectors, *Bulletin of JSME*, v.27, n.223, p.64-69, 1989.
- OGAWA, A. Mechanical Separation Process and Flow Patterns of Cyclone Dust Collectors, *Appl. Mech. Ver.*, v.50, n.3, p.97-130, 1997.
- PATANKAR, S.V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Ed. McGraw-Hill, New York, 193p., 1980.

- PATTERSON,P.A.; MUNZ,R.J. Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperatures, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.67, p.321-328, 1989.
- PATTERSON,P.A.; MUNZ,R.J. Gas and Particle Flow Patterns in Cyclones at Room and Elevated Temperatures, The Canadian Journal of Chemical Engineering, v.74, p.213-221, 1996.
- PERES,A.P. Estudo Experimental da Transferência de Calor em Ciclones. Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 102p., 1997.
- PERES,A.P.; CREMASCO,M.A. Proposta de uma Correlação para o Coeficiente de Transferência de Calor Gás/Partícula em um Ciclone. Anais do XXIV ENEMP, v.2, p.512-517, Uberlândia, 1997.
- 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 3-D do escoamento Gasoso em um Ciclone. Anais do XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), v.8, p.79-87, Uberlândia, 2001.
- PERES,A.P.; MEIER,H.F.; HUZIWARA,W.K.; MORI,M. Experimental Study and Advances in 3-D Simulation of Gas Flow in a Cyclone Using CFD. Computer-Aided Chemical Engineering, v.10, European Symposium on Computer Aided Process Engineering (ESCAPE) – 12, p.943-948, ELSEVIER SCIENCE, Amsterdã, Holanda, 2002a.
- PERES,A.P.; KASPER,F.R.S.; MEIER,H.F.; MORI,M. Simulação 3-D do Escoamento Gasoso em um Ciclone Usando Técnicas de Fluidodinâmica Computacional. Anais

do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química (COBEQ), em CDrom, 8p., Natal, 2002b.

PERICLEOUS,K.A. Mathematical Simulation of Hydrocyclones, Appl. Math. Modeling, v.11, p.242-255, 1987.

RIBEIRO,D.R. Implementação de Modelo de Fechamento em Risers de FCC Através de Código Comercial CFD. Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 127p., 2001.

ROSA,L.M. Simulação de Reações Químicas e Consumo de Calor em Risers. Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 75p., 2002.

SCHILLER,L.; NAUMAN,A. V.D.I. Zeits, v.77, 318, 1933.

SILVA,M.A. Estudo da Secagem em Ciclones, Tese de Doutorado, FEM/UNICAMP, Campinas,1991.

SLACK, M.D.; PRASAD, R.O.; BAKKER,A.; BOYSAN,F. Advances in Cyclone Modelling using Unstructured Grids. Trans IChemE,v.78,part A,p.1098-1104, 2000.

SOUZA,D.R.C. Desenvolvimento de um Software Aplicativo em Linguagem C para Cálculo de Eficiência e Perda de Carga de Ciclones. Dissertação de Mestrado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 200p.,1994.

SPEZIALE,C.G. Analytical Methods for Development of Reynolds-Stress Closures in Turbulence, Annual Ver. Fluid Mech.,v.23,p.107-157,1991.

- STAIRMAND,C.J. The Design and Performance of Cyclone Separator. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, v.29, p.356-383, 1951.
- SUASNABAR,D.J.; FLETCHER,C.A.J. A CFD Model for Dense Medium Cyclones. 2<sup>nd</sup> International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, p.199-204, Australia, 1999.
- SZEKELY,J.;CARR,R. Heat Transfer in a Cyclone, Chemical Engineering Science, v.21, p.1119,1966.
- THOMPSON,C.P.; WILKES,N.S. Numerical Experiments with Higher-order Finite Difference Formulae. AERE Harwell Report, R.10493, HMSO, 1982.
- VAN DOORMAL,J.P.; RAITHBY,G.D. Enhancements of the SIMPLE Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, *Num. Heat Transfer*, v.7, p.147, 1984.
- WITT,P.J.; MITTONI,L.J; WU,J.; SHEPHERD,I.C. Validation of a CFD Model for Predicting Gas Flow in a Cyclone. *CHEMECA 99*, 6p., Australia, 1999.
- XIANG,R.; PARK,S.H.; LEE,K.W. Effects of Cone Dimension on Cyclone Performance. *J. Aerosol Science*, v.32, p.1135-1146, 2001.
- YEN,S.C.; LU,W-M; SHUNG,S.C. Gas-Solid Heat Transfer in a Gas Cyclone. *Journal of Chinese Institute of Chemical Engineering*, v.21, n.4, p.197, 1990.
- YUU,S.; JOTAKI,T.; TOMITA,Y.; YOSHIDA,K. The Reduction of Pressure Drop due to Dust Loading in a Conventional Cyclone. *Chemical Engineering Science*, v.33, p.1573-1580, 1978.

ZENS,F.A. Cyclone Separators in Manual on Disposal of Refinery Wastes: Volume on Atmospheric Emissions, API Publication 931, Washington-USA, 1975.

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.