

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

*Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones
do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido*

Autora: Eng. Marcela Kotsuka da Silva
Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Antonio Francisco Machado

Florianópolis-SC, Fevereiro de 2006.

Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

*Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones
do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Autora: Eng. Marcela Kotsuka da Silva
Orientador: Prof. Dr. Marinho Bastos Quadri
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Antonio Francisco Machado

Florianópolis-SC, Fevereiro de 2006.

Estudo de Modelagem Numérica Tridimensional de Ciclones do Tipo Lapple para Separação Gás-Sólido

Por

Marcela Kotsuka da Silva

Dissertação julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

Marinho Bastos Quadri
Orientador

Ricardo Antonio Francisco Machado
Co-Orientador

Agenor Furigo Junior
Coordenador

Banca Examinadora:

Marinho Bastos Quadri
Orientador

Ricardo Antonio F. Machado
Co-Orientador

Regina de Fátima P. M. Moreira
Membro Interno

Sérgio Bernardo
Membro Externo

Florianópolis, fevereiro de 2006.

Aos meus pais Orandi e Nadir com muito amor e carinho

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida.

À minha família, pelo incentivo durante esses dois anos de pesquisa. Pelo apoio nas horas mais difíceis.

Ao meu orientador Professor Doutor Marinho Bastos Quadri, por todo o apoio, e valiosa orientação.

Ao meu co-orientador Professor Doutor Ricardo Antonio F. Machado, por todas as importantes contribuições que fizeram este trabalho possível.

Ao pessoal do Laboratório de Controle de Processos (LCP) pelo constante apoio, nas dificuldades surgidas durante o trabalho.

Aos amigos Henry G. Brandolt e ao Carlos A. Claumann, companheiros de pesquisa que ajudaram na concretização desse projeto. Agradeço pelas valiosas discussões que contribuíram muito para o final deste trabalho.

Ao Eng. Doutor Sérgio Bernardo pelo “suporte técnico” durante toda a execução do trabalho. E mais ainda pela amizade criada durante esses dois anos.

Ao Programa de pós-graduação em Engenharia Química da UFSC pela oportunidade e por oferecer condições para o desenvolvimento desse trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro através da bolsa de mestrado durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Douglas pelo apoio, presença ao meu lado mesmo à distância, e pela ajuda “nos desenhos” desse trabalho.

Aos amigos e companheiros de pós-graduação, Fernanda, Gustavo, Daniela, Ana Claudia, entre outros que foram de grande importância nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos que participaram, direta ou indiretamente, na elaboração desse trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE TABELAS	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 01	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivos específicos	3
CAPÍTULO 02	4
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 Descrição do Ciclone	4
2.1.1 Tipos de Ciclones.....	7
2.2 Métodos numéricos.....	8
2.2.1 Método dos volumes finitos.....	9
2.2.2 Esquemas de Interpolação.....	10
2.2.3 Difusão Numérica	12
2.2.4 Acoplamento Pressão-Velocidade	13
2.3 Fluidodinâmica Computacional	16
2.3.1 Gerador de Geometria.....	17
2.3.2 Gerador de Malha	18
2.3.3. Pré-Processamento	19
2.3.4. <i>Solvers</i>	19
2.3.5. Pós-Processamento	20
2.4 O Método Multigrid.....	20
CAPÍTULO 03	22
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 Eficiência de coleta	22
3.2 Queda de pressão	25
3.3 CFD e ciclones.....	26
CAPÍTULO 04	36
MODELAGEM MATEMÁTICA	36
4.1 Modelo Geral de Meier (1998)	36
4.1.1 Características do Modelo Geral de Meier (1998).....	39
4.2 Modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional	40
4.3 Modelos de turbulência.....	40
4.3.1 Modelo k- ϵ padrão	40
4.3.2 Modelo RNG k- ϵ (<i>Re-Normalization Group</i>).....	42
4.3.3 Modelo RSM (<i>Reynolds Stress Model</i>).....	43
CAPÍTULO 05	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Simulações Preliminares com Ciclone de 0,254m de diâmetro.....	46
5.2 Estudo de refinamento e aperfeiçoamento da malha numérica	54
5.3 Eficiência de coleta e validação do modelo com um ciclone de 0,127m de diâmetro	64
CAPÍTULO 06	70
CONCLUSÕES	70

CAPITULO 07	73
REFERÊNCIAS.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ciclone.....	5
Figura 2.2.: Localização dos pontos da função de interpolação.....	10
Figura 2.3: Soluções com presença de (a) oscilação numérica, (b) difusão numérica.	13
Figura 5.1: Malha tetraédrica.....	47
Figura 5.2: Distribuição da fração volumétrica de sólidos no interior do ciclone para dp = 3,70µm.....	47
Figura 5.3: Distribuição da fração volumétrica de sólidos para dp = 2,25µm.....	48
Figura 5.4: Distribuição da pressão ao longo do ciclone.....	49
Figura 5.5: Distribuição de velocidades axiais do gás ao longo do ciclone.....	51
Figura 5.6: Distribuição de velocidades tangenciais do gás ao longo do ciclone.....	52
Figura 5.7: Distribuição de velocidade total das partículas.....	53
Figura 5.8: Gráfico da variação da queda de pressão em função do tempo real de simulação para dp = 2,25µm.....	54
Figura 5.9: Malha tetraédrica sem adição da camada de prismas.....	55
Figura 5.10: Distribuição da fração volumétrica de sólidos no plano XY na posição z = 0,45m.....	55
Figura 5.11: Perfil da fração volumétrica de partículas no eixo X na altura do finder sem refino de malha.....	56
Figura 5.12: Distribuição da fração volumétrica de partículas para a malha com prismas na posição z = 0,45m.....	57
Figura 5.13: Perfil da fração volumétrica de partículas no eixo X na altura do finder com malha de três camadas de prismas junto às paredes.....	58
Figura 5.14: Malha refinada com cinco camadas prismáticas.....	58
Figura 5.15: Distribuição da fração volumétrica de sólidos na posição z = 0,45m, para a malha com cinco camadas de elementos prismáticos junto às paredes.....	59
Figura 5.16: Perfil da fração volumétrica de sólidos no eixo X.....	59
Figura 5.17: Perfil de pressão ao longo do eixo X na posição z = 0,35m.....	60
Figura 5.18: Pressão ao longo do ciclone e velocidade do gás.....	61
Figura 5.19: Perfil da velocidade tangencia ao longo do eixo X na posição z = 0,30m.	62
Figura 5.20: Variação da eficiência de coleta em tempo de simulação para o ciclone com diâmetro de 0,254m e malha cinco camadas prismáticas.....	63
Figura 5.21: Distribuição da fração volumétrica de sólidos para partículas de diâmetro médio de 2,6µm.....	64
Figura 5.22: Distribuição da pressão para o ciclone de 0,127m de diâmetro.....	65
Figura 5.23: Distribuição da velocidade tangencial do gás para o ciclone de 0,127m de diâmetro.....	66
Figura 5.24: Distribuição da velocidade total das partículas para o ciclone de 0,127m de diâmetro.....	67
Figura 5.25: Evolução da queda de pressão global em função no tempo real simulado.	67
Figura 5.26: Eficiência de coleta para diferentes tempos simulados.....	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Dimensões relativas dos ciclones Lapple e Stairmand	7
Tabela 5.1: Condições de contorno no ciclone.	46
Tabela 5.2: Diâmetro médio de partículas e eficiência de coleta	49
Tabela 5.3: Queda de pressão global através do ciclone	50
Tabela 5.4: Eficiências de coleta simuladas para o dpc comparadas com o valor de Lapple	62
Tabela 5.5: Queda de pressão para diferentes diâmetros de partículas.....	68

NOMENCALTURA

- a- Altura do ciclone
- b- Largura da entrada do ciclone
- B- Diâmetro da saída de sólidos
- De- Diâmetro do tubo de saída de gás
- Dc- Diâmetro do ciclone
- dpc- Diâmetro de corte
- $d_{p_{\text{médio}}}$ - Diâmetro médio das partículas
- ξ - Constante para o cálculo da pressão
- ε - Taxa de dissipação da energia cinética
- ϕ - Variável genérica
- h- Altura da parte cilíndrica do ciclone
- H- Altura total do ciclone
- k- Energia cinética de turbulência
- \dot{m} - Vazão mássica
- ρ - Densidade
- Q- Vazão volumétrica
- S- Termo fonte
- Γ - Termo difusivo
- \vec{V} - Vetor velocidade
- v - Velocidade
- v_i – Velocidade inicial

RESUMO

Ciclones são equipamentos que empregam uma resultante entre as forças de arraste, força peso, centrífuga e inércia para separar partículas. Por possuir simples desenho e baixo custo de manutenção, eles são ideais para serem usados como pré-limpadores de efluentes com material particulado em suspensão. A técnica de CFD (*Computational Fluid Dynamics*) aparece como uma importante ferramenta para a pesquisa e desenvolvimento de processos de engenharia. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo de modelagem tridimensional de ciclones do tipo Lapple a partir dos modernos recursos de CFD. O trabalho foi dividido em três partes: análise do escoamento e avaliação do desempenho de um ciclone de diâmetro similar aos utilizados em plantas de FCC (*fluid catalytic cracking*); estudo de refino da malha numérica visando diminuir os efeitos de difusão numérica de forma a obter resultados mais acurados; e, finalmente, a validação do modelo proposto através de uma curva empírica de eficiência de coleta e também de critérios numéricos. Todas as simulações foram realizadas considerando o escoamento bifásico, com o modelo de turbulência RSM (*Reynolds stress model*), e esquema de interpolação *upwind* de segunda ordem para as variáveis descritivas. Na primeira parte do estudo, os testes foram feitos com um ciclone de diâmetro igual a 0,254m, sendo as demais medidas de acordo com as relações propostas por Lapple (1951). Os resultados preliminares obtidos para os campos de pressão, velocidade e concentração de partículas se mostraram qualitativamente coerentes com os da literatura, entretanto, a malha numérica utilizada necessitou de um refinamento a fim de melhorar os resultados de simulação, visto que as eficiências obtidas apresentaram desvios em relação àquelas indicadas por Lapple (1951). Foram colocadas camadas de prismas junto às paredes do ciclone e do *finder*. Os resultados obtidos com a malha refinada passaram a prever corretamente o desempenho de coleta, como também descreveram adequadamente o comportamento do escoamento no ciclone. Para a validação do modelo, as simulações foram feitas com um ciclone de diâmetro de 0,127m. As eficiências de coleta para diferentes diâmetros de partículas coincidiram aproximadamente com as de Lapple (1951). Desta forma, pode-se afirmar que o modelo tridimensional proposto é válido para simular o escoamento gás-sólido em ciclones, assim como prever adequadamente a eficiência de separação.

ABSTRACT

Cyclones are devices that employ a resulting force between the drag, gravital, centrifugal and inertial force to separate particles from the carrier gas. Because of the simple design, low capital cost, they are ideal for use as a pre-cleaner of the effluents with suspension material. The CFD technique (Computational Fluid Dynamics) appears like a strong engine to predict engineering projects. In this work was developed a three-dimensional modeling for Lapple's kind of cyclones from the modern CFD resources. The work was divided in three parts: analyzing the flow and performance evaluation of a cyclone with a diameter similar to one that is used in FCC plants (fluid catalytic process), studying of a mesh refine to decrease the effects of the numerical diffusion for obtaining better results; and, finally the validation of the proposed model through a empirical curve of collection efficiency and numerical criteria. All of the simulations were realized considering the gas-solid flow, with the turbulence model RSM (Reynolds stress model), and second order upwind as interpolation scheme for the descriptive variables. In the first part of the study, the tests were done with a cyclone which has a diameter equal 0,254m, and the others measures follow the proposed relations by Lapple (1951). The preliminary results for the fields of pressure, velocity and particle concentration showed themselves qualitatively coherent with those of the literature, however the numerical mesh used needed a refining for better simulations results, since the obtained efficiencies presented deviation related for those indicated by Lapple (1951). It was put prisms layers on the cyclone and the finder's walls. The obtained results with the refine mesh passed to foresee correctly the collection performance, it also described adequately the behavior of the cyclone flux. For modeling validation, the simulations were realized with a cyclone diameter of the 0,127m. The collections efficiency for different particle's diameters coincided approximately with those by Lapple (1951). In this way, it can affirm that the three-dimensional proposed model is valid for simulating the gas-solid flux in cyclones and it can foresee adequately the separation efficiency.

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

Os ciclones estão entre os antigos tipos de equipamentos da indústria de particulados. Eles têm sido usados em diferentes processos industriais, tais como processos físicos de separação e reações químicas.

Os ciclones são amplamente usados como separador gás-sólido, pois sua estrutura é simples e possui baixo custo de operação. Os ciclones podem ser adaptados em operações de condições extremas como: altas pressões, altas temperaturas e gases corrosivos, desde que usado o material apropriado na sua construção.

Uma grande quantidade de dados experimentais sobre ciclones é encontrada na literatura; a maioria desses dados foi coletada usando medidores de tubos de impacto, mas isso antes dos anemômetros do tipo *Laser-Doppler* ou sondas eletrônicas. Entretanto medidores de impacto apresentam pouca precisão quando aplicados a certos processos, pois não possuem sensibilidade suficiente para fluxos turbulentos de alta intensidade.

Os parâmetros geométricos e operacionais dos ciclones podem ser calculados por meio de equações de projeto. De posse dessas equações, a eficiência de coleta, queda de pressão e vazão volumétrica podem ser calculados facilmente.

Os principais parâmetros relacionados ao projeto e desempenho dos ciclones são os diâmetros de corte (dpc), que é o diâmetro médio de partículas onde a eficiência de coleta é de 50%, a queda de pressão e a eficiência de coleta. Esses parâmetros são influenciados pela vazão de entrada de sólidos, pelo tipo de fluido, pela natureza das partículas que serão separadas, pela geometria do ciclone, entre outras características do problema.

Mas recentemente, vários estudos foram realizados para ciclones de tamanho reduzido, podendo citar: Liden e Kenny, (1991); Overcamp e Scarlett, (1993); Maynard e Kenny, (1995); Kenny e Gussman, (1997). Descobriu-se que como a

maioria dos modelos existentes para ciclones é baseada em modelos semi-empíricos, portanto sem, uma profunda base na mecânica de fluidos na fenomenologia do processo de escoamento.

Há necessidade de se aperfeiçoar projetos de ciclones, pois as novas tecnologias associadas requerem o tratamento de gases para a remoção de particulados, necessário para o controle da poluição.

Também, com as novas aplicações e expansão das indústrias químicas, alimentícias, farmacêuticas, de cimento e de petróleo, cresceu a necessidade de uma maior eficiência dos equipamentos. Assim, os ciclones vêm passando por uma transformação, de equipamentos de baixa tecnologia para média ou alta tecnologia.

As soluções analíticas descritas no passado para escoamentos em ciclones, além de bidimensionais, representavam somente o movimento do gás, e devido às aproximações introduzidas, estes resultados eram somente válidos para as características principais do fluxo de vórtex, uma vez que as soluções numéricas são fortemente dependentes do modelo de turbulência usado.

Modelos matemáticos que podem descrever as variáveis hidrodinâmicas em geometrias bidimensionais e tridimensionais estão se tornando cada vez mais objeto de pesquisas e vários trabalhos têm incorporado o fenômeno da turbulência.

A fluidodinâmica computacional, CFD (*computational fluid dynamics*), capaz de resolver equações não-lineares que descrevem o escoamento dos fluidos, tem sido utilizada para modelar ciclones com diferentes níveis de complexidade, tornando-se uma importante ferramenta no estudo de vários aspectos operacionais tais como: reversão de fluxo, alta vorticidade, zonas de circulação e fluxo descendente.

1.1 Objetivos

O desenvolvimento deste trabalho tem como principais objetivos: validar o modelo computacional através de correlações empíricas e de critérios numéricos, buscando verificar a curva de eficiência estabelecida por Lapple (1951) para diferentes diâmetros de ciclones, ao mesmo tempo em que se empreende um estudo sobre a adequação da malha utilizada nas simulações numéricas.

Como a fluidodinâmica do escoamento no interior dos ciclones é ainda objeto de pesquisa, busca-se também ampliar o conhecimento dos fenômenos envolvidos, utilizando-se as modernas técnicas de CFD.

1.1.1 Objetivos específicos

- Em muitos trabalhos anteriores sobre ciclones a influência das partículas no fluxo de fluido não é considerada. Com o modelo proposto, pretende-se verificar o efeito da presença de sólidos particulados no escoamento;
- Aplicar o modelo de Reynolds, que considera a anisotropia dos tensores, na descrição do escoamento turbulento, pois grande parte do material bibliográfico consultado apresenta modelos isotrópicos;
- Avaliar o refino de malha na parede do ciclone e na parte externa do *finder*, buscando a redução dos efeitos da difusão numérica;
- Verificar a relação empírica de Lapple (1951) da eficiência de coleta de ciclones, mediante uma série de ensaios numéricos;
- Determinar a duração da etapa transiente, quando do início da operação com o ciclone.

CAPÍTULO 02

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os tipos de ciclones, os princípios de funcionamento e principais características operacionais. Também será apresentado o método numérico para obtenção das soluções das equações envolvidas no trabalho, discutindo-se os esquemas de interpolação, difusão numérica e o acoplamento pressão-velocidade. Além disto, alguns comentários serão tecidos sobre as modernas técnicas da fluidodinâmica computacional e sobre alguns aspectos relacionados com a sua implementação.

2.1 Descrição do Ciclone

O ciclone é composto por uma parte cônica e outra cilíndrica, que juntas formam o corpo do ciclone. A entrada do ciclone é usualmente tangencial à parede da parte cilíndrica próxima ao topo. O tubo de saída do gás, usualmente chamado de vórtex ou *finder*, é fixo na parte superior do ciclone.

Os separadores ciclônicos são amplamente usados para remoção de partículas do ar ou de gases de processos. São utilizados também como reator químico, trocador de calor, para secagem de materiais granulares e combustão de óleo. Em refinarias de petróleo, ele é utilizado para assegurar a continuidade do processo para obtenção da gasolina, retendo o catalisador impedindo sua emissão para a atmosfera, evitando a perda e o efeito poluente. Sua grande aplicabilidade deve-se ao seu baixo custo de operação e fácil manutenção, como também à possibilidade de suportar severas condições de temperatura e pressão.

A suspensão gás-sólido entra no ciclone (Figura 2.1) por uma entrada tangencial e inicia um escoamento giratório na seção anular compreendida entre o tubo de saída do gás e o corpo do ciclone (Meier, 1998). O movimento das partículas sólidas pode ser avaliado com relação ao efeito das forças atuantes sobre as mesmas por estarem

centradas na corrente de gás. De acordo com Corrêa (2003), a trajetória das partículas sólidas será determinada pelo balanço de forças resultantes entre a força peso (atuando sobre as partículas) e a força de arraste (do movimento do gás), além de sua própria inércia, ou seja, devido ao impulso que a partícula já possui em função de sua massa e velocidade de entrada. Assim, as partículas sólidas se movimentam em direção às paredes do ciclone devido à sua própria inércia. As partículas menores atingem a parede interna do *finder* e, praticamente, deslizam junto à parede. Sendo que na parede externa do *finder* é observado o mesmo movimento (Meier, 1998). O gás inicia um escoamento giratório com alta velocidade, promovendo um acréscimo na intensidade de turbulência. Esse acréscimo promove uma dispersão de quantidade de movimento que associado às parcelas convectivas e suas resultantes, como força centrífuga e de Coreolis, conduzem ao movimento giratório com reversão de fluxo e preservação de vorticidade (Meier, 1998). Devido a efeitos de geometria e aos decorrentes do comportamento fluidodinâmico, o gás apresenta ainda regiões de recirculação, que elevam o tempo de residência das partículas e provocam erosão na estrutura metálica dos ciclones, devido à frequência dos choques com a parede (Meier, 1998).

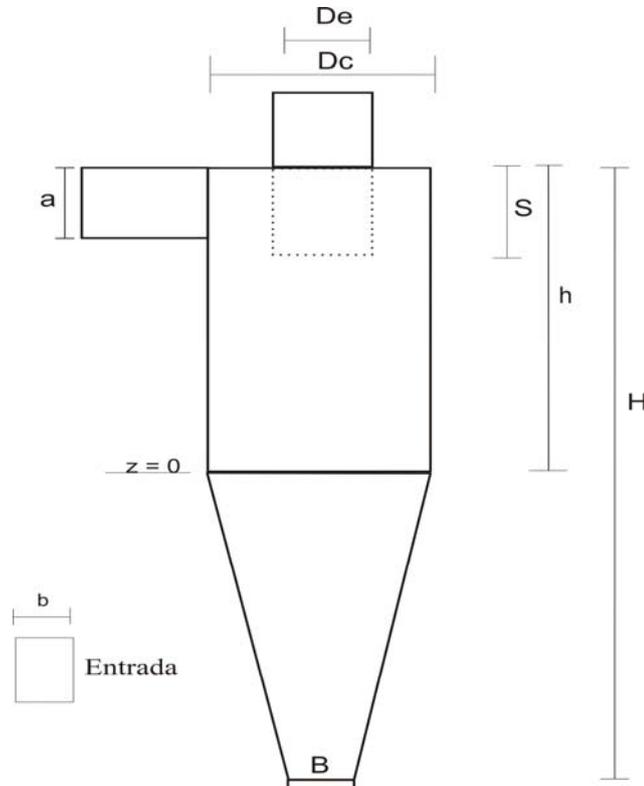


Figura 2.1: Ciclone.

Onde:

D_c é o diâmetro do ciclone;

D_e é o diâmetro do tubo de saída de gás (vórtex);

a é a altura da entrada;

b é a largura da entrada;

S é a altura do *finder*;

h é a altura da parte cilíndrica;

H é a altura total do corpo do ciclone;

B é o diâmetro da saída de sólidos;

$z = 0$ corresponde a posição do plano médio.

Os coletores ciclônicos são usados também para recuperar produtos e como coletor primário de altos carregamentos de sólidos no controle da poluição. Eles são usados em processos onde o particulado é pesado suficiente para ser influenciado pela força centrífuga. O uso de ciclones é favorável para aplicações onde o pó coletado possui um alto valor agregado.

Vários modelos de ciclones têm sido propostos, mas o ciclone de fluxo reverso é o tipo mais comumente usado na indústria de limpeza de gases.

Como a força inercial é usada, geralmente as partículas com diâmetro aerodinâmico maior que $5\mu\text{m}$ podem ser melhor separadas. Partículas de areia, por exemplo, são relativamente fáceis de separar. Alguns outros tipos de pó, como cinzas, são mais difíceis de remover necessitando-se depois dos ciclones de um equipamento adicional.

A eficiência de coleta de um ciclone é definida como a fração da massa de sólidos alimentados que são retidos pelo ciclone. Em cada tipo de coleta, as forças e a maneira como as partículas são coletadas dependem do tamanho da partícula, da sua forma e da sua densidade. Conseqüentemente, diferentes partículas podem ser coletadas com diferentes graus de eficiência.

A eficiência é influenciada por vários fatores, tais como: as condições de operação, as propriedades físicas do material sólido alimentado e a geometria do ciclone. O aumento da velocidade de entrada aumenta a força centrífuga, aumentando a eficiência, mas a queda de pressão também aumenta nesse caso. A diminuição da

viscosidade do gás aumenta também a eficiência, pois a força de arraste é diminuída. Para um mesmo sólido, diferentes ciclones levam a diferentes valores de eficiência.

2.1.1 Tipos de Ciclones

Existem vários tipos de ciclones na literatura, sendo os mais conhecidos o Lapple e o Stairmand de alta eficiência. Esses tipos de ciclones têm suas características geométricas apresentadas na Tabela 2.1 relacionadas à Figura 2.1 do ciclone.

Tabela 2.1: Dimensões relativas dos ciclones Lapple e Stairmand

Tipo de ciclone	De/Dc	a/Dc	b/Dc	S/Dc	h/Dc	(H-h)/Dc	B/Dc
Lapple	0,500	0,500	0,250	0,625	2,000	2,000	0,250
Stairmand	0,500	0,500	0,200	0,500	1,500	2,500	0,375

As relações entre as dimensões dos ciclones descritos na Tabela 2.1 foram desenvolvidas através de medidas experimentais, objetivando obter altas eficiências, e baixas quedas de pressão. A vantagem de se utilizar esses modelos tradicionais é o grande número de estudos realizados por vários autores.

De acordo com Lapple (1951), o desempenho de um ciclone pode ser especificado em termos do diâmetro de corte, d_{pc} , o qual é o tamanho de partículas que o ciclone irá coletar com uma eficiência de 50%. O ciclone do tipo Lapple tem a dimensões proporcionais ao diâmetro da parte cilíndrica do ciclone, D_c , mostradas na Tabela 2.1.

O diâmetro de corte de um ciclone depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições operacionais. Segundo Lapple (1951), esse valor pode ser calculado pela equação:

$$d_{pc} = \left(\frac{9 \mu b}{2 \pi N e v (\rho_s - \rho_g)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Onde:

μ é a viscosidade do gás;

b é a largura da entrada do ciclone;

Ne é o número de voltas que o gás executa no interior do ciclone, no caso de um ciclone Lapple o valor usado é de 5;

v a velocidade de alimentação;

ρ_s e ρ_g são as densidades do sólido e do gás, respectivamente.

Contudo, na prática, Stairmand (1951), diz que um número considerável de partículas, menores do que o diâmetro de corte, são separadas junto com as maiores, possivelmente pela colisão entre essas partículas ou devido a uma agregação destas. Também um número de partículas maiores que o dpc escapam junto com o gás limpo sendo carregadas pelo vórtex.

A eficiência de coleta pode ser calculada através da razão:

$$\eta = \frac{m_s}{m_e} \quad (2.2)$$

Onde: η é a eficiência do ciclone;

m_s é a vazão mássica de sólidos na saída inferior;

m_e é a vazão mássica de entrada de sólidos.

Existem condições de operação recomendadas para cada tipo de ciclone. No caso do ciclone Lapple o intervalo de velocidades recomendado é entre 6 e 21 m/s; geralmente, trabalhando-se com velocidades em torno de 15 m/s; já para o ciclone Stairmand, o intervalo está entre 6 e 30 m/s (Massarani,1997).

2.2 Métodos numéricos

O uso das técnicas numéricas para a solução de problemas da engenharia e da física é hoje uma realidade, graças ao desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento (Maliska, 2004).

A tarefa do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo-se as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a função incógnita. Quando a solução analítica não é possível, e opta-se pela numérica, a solução obtida será para um número discreto de pontos, com um determinado erro,

esperando-se que, quanto maior o número de pontos, mas próximo da solução exata estará a numérica.

2.2.1 Método dos volumes finitos

Em problemas envolvendo escoamentos de fluidos, é importante que a modelagem numérica atenda os princípios de conservação localmente e por todo o domínio.

O método dos volumes finitos é todo aquele que, para obter as equações aproximadas, satisfaz a conservação da propriedade para cada volume elementar do domínio discretizado (Maliska, 2004).

Neste método o domínio de cálculo é dividido em volumes de controle, que contêm nós; cada um desses nós é representado por somente um volume de controle. As variáveis são definidas no centro dos volumes de controle, e as equações são integradas sobre esses volumes para se obter uma equação discreta, que conecta as variáveis no centro do volume de controle com sua vizinhança.

As equações que são resolvidas possuem a mesma forma geral, dada por:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \phi) - \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) = S \quad (2.3)$$

Onde:

ρ é a massa específica;

\vec{U} é o vetor velocidade;

ϕ é a variável genérica;

Γ é o termo difusivo;

S é o termo fonte

O primeiro termo do lado esquerdo da equação (2.3), é o termo temporal que permite avançar a solução no tempo.

O segundo termo, representa a parcela convectiva do balanço sendo, do ponto de vista numérico, a de tratamento mais delicado, devido às não-linearidades.

O terceiro termo da equação trata-se do balanço dos fluxos difusivos. O último termo, à direita da igualdade é o termo fonte, que pode acomodar parcelas adicionais.

O método dos volumes finitos aplicado em *CFD* resulta em duas vantagens: primeiro, a discretização é conservativa, sendo massa, momento e energia conservados no elemento de volume; e, segundo, porque o método não requer uma transformação de coordenadas para ser aplicado em malhas irregulares ou desestruturadas.

2.2.2 Esquemas de Interpolação

A função de interpolação tem o papel de conectar os pontos nodais, local de armazenamento da variável ϕ . A tentativa é sempre utilizar uma função de interpolação com o menor erro de truncamento possível, e que não envolva muitos pontos nodais. A Figura (2.2) mostra a localização dos pontos no volume elementar.

As funções de interpolação podem ser associadas aos coeficientes α e β , dependentes do número de Peclet permitindo a ponderação entre a advecção e a difusão. Tomando a face leste como exemplo, os valores de ϕ na interface podem ser escritos como:

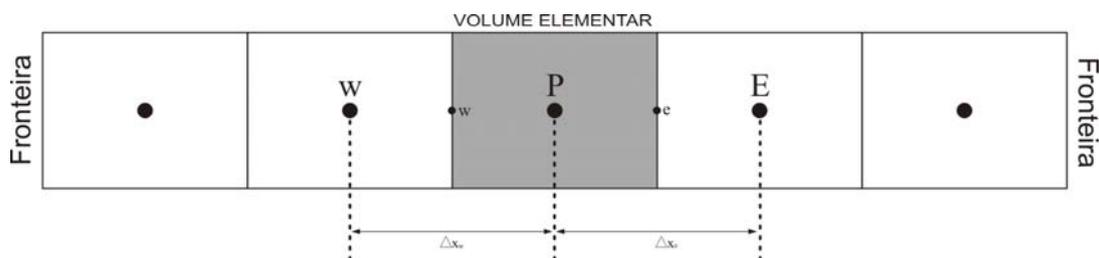


Figura 2.2.: Localização dos pontos da função de interpolação.

$$\phi_e = \left(\frac{1}{2} + \alpha_e \right) \phi_P + \left(\frac{1}{2} - \alpha_e \right) \phi_E \quad (2.4)$$

$$\Gamma_e^\phi \frac{\partial \phi}{\partial x} = \beta_e \Gamma_e^\phi \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x_e} \right) \quad (2.5)$$

— Esquema das Diferenças Centrais (CDS)

Este esquema usa uma interpolação linear, podendo gerar coeficientes de discretização negativos, o que não é desejável. É um esquema de segunda ordem, não robusto, portanto raramente utilizado. O valor da função na interface é obtido fazendo-se:

$$\alpha = 0 \text{ e } \beta = 1; \quad (2.6)$$

O uso desse esquema de interpolação na aproximação dos termos advectivos cria, quase sempre, coeficientes negativos, pois é impossível, em problemas reais, refinar a malha até forçar sua positividade, ou seja, manter $Pe \leq 2$ para todo os volumes elementares.

— Esquema *Upwind*

O uso dessa função de interpolação evita os coeficientes negativos. É um esquema de interpolação de primeira ordem, onde o valor da função na interface é o mesmo no volume à montante, logo:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{2} & \text{se } v \geq 0 \\ \alpha &= -\frac{1}{2} & \text{se } v < 0 \\ \beta &= 1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

— Esquema WUDS (*Weighted Upstream Differencing Scheme*)

Para este esquema, de acordo com Raithby, (1976), têm-se os seguintes valores para os coeficientes α e β :

$$\alpha = \frac{Pe^2}{10 + 2Pe^2}$$

$$\beta = \frac{1 + 0,005Pe^2}{1 + 0,05Pe^2} \quad (2.8)$$

Onde Pe é o número de Peclet, sendo este baseado em Δx .

Esquemas desse tipo, onde α e β variam no domínio de cálculo procurando “pesar” as influencias da difusão e da convecção, são chamados de esquemas híbridos (Maliska, 2004).

2.2.3 Difusão Numérica

Se a função de interpolação adotada for a de diferenças centrais para os termos advectivos, existem dois riscos: o primeiro é a divergência da solução provocada pelo uso de métodos de solução de sistemas lineares não-aptos ao tratamento de coeficientes negativos, e o segundo é a obtenção de soluções não-realísticas, apresentando oscilações numéricas (Figura 2.3a), visto que o esquema de interpolação de diferenças centrais não dissipa as perturbações inerentes ao processo de solução. O tratamento para as oscilações, para solução com segunda ordem de precisão, é o refino da malha.

Se a interpolação usada for *upwind*, o esquema resulta bastante estável, obtendo-se sempre uma solução realística, mas com alta dissipação embutida (Figura 2.3b). Essa dissipação ocorre nas regiões de grandes gradientes, podendo levar a uma solução falsa (Maliska, 2004).

O operador *upwind* tem a propriedade de suavizar os grandes gradientes. Esse mecanismo de suavização dos gradientes é equivalente ao processo de difusão física de uma propriedade, sendo por isso chamado de difusão numérica ou falsa difusão.

Segundo Maliska (2004), o uso de funções de interpolação não-exatas gera erros de truncamento que podem estar associados a esquemas dissipativos ou não. Erros de truncamento associados às funções de interpolação do tipo diferenças centrais são erros não-dissipativos, que produzem as oscilações numéricas, enquanto que os associados a funções de interpolações do tipo *upwind* são dissipativos e suavizam os gradientes existentes no domínio, produzindo a difusão numérica.

Portanto a difusão numérica resulta dos erros de truncamento de natureza dissipativa, associados aos termos advectivos, originados do fato de a função de interpolação não ser exata. A difusão diminui com o refino da malha, o que também ocorre com os erros de truncamento.

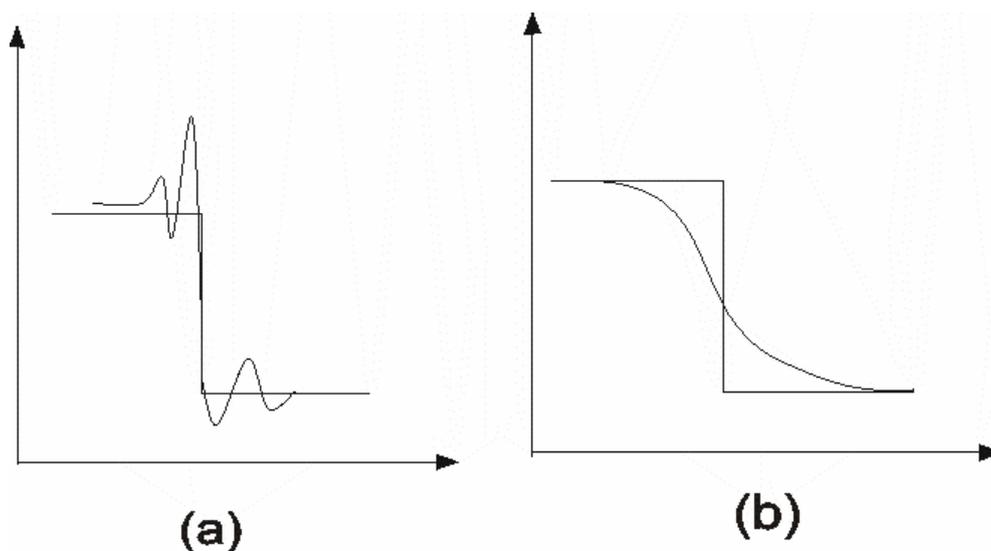


Figura 2.3: Soluções com presença de (a) oscilação numérica, (b) difusão numérica.

2.2.4 Acoplamento Pressão-Velocidade

A natureza segregada do processo de solução requer que cada variável tenha uma equação evolutiva para ser avançada. As componentes da velocidade u , v e w podem ser avançadas por meio da equação de movimento nas três direções (Maliska, 2004). No caso da pressão, para que esta tenha sua própria equação, o escoamento deve ser compressível, ou seja, ρ deve variar fortemente com a pressão. Portanto, é

necessário determinar um campo de pressões que, quando inserido nas equações do movimento, origine um campo de velocidades que satisfaça a equação da conservação da massa.

Se ρ tem variação considerável com P , então a equação de estado, relacionando ρ com a temperatura e a pressão, é a relação empregada para o fechamento do problema. A equação de estado é então a equação evolutiva para a pressão, enquanto a equação da continuidade o é para a massa específica. A formulação onde todas as variáveis dependentes possuem a sua equação de evolução é chamada de formulação compressível.

Os problemas compressíveis podem ser resolvidos de acordo com os seguintes passos:

- Calcular ρ no instante $t + \Delta t$, usando a equação da conservação da massa, depois a temperatura a partir da equação da energia;
- A pressão é obtida através da equação de estado e as velocidades pelas equações de movimento para cada direção;
- Reiniciar o cálculo de ρ , e avançar a solução para um novo intervalo de tempo até atingir o regime permanente (transiente real) ou até atingir a convergência (transiente distorcido).

Se a massa específica não varia significativamente com a pressão, mas tem variação considerável com a temperatura, o problema ainda pode ser definido como compressível. Entretanto, a equação de estado $P = P(\rho, T)$ não pode ser usada, pois erros cometidos no cálculo de ρ , através da equação de conservação da massa, poderão produzir grandes erros em P .

A equação de estado passa a ser uma equação para ρ , e a pressão passa a não possuir uma equação evolutiva, aparecendo sua influência apenas através do seu gradiente nas equações de movimento. A equação da conservação da massa não serve de equação evolutiva para nenhuma variável e passa a ser, apenas, uma restrição que deve ser obedecida pelo campo de velocidades. Portanto é necessário determinar um campo de pressões que, quando inserido nas equações do movimento, origine um campo de velocidades que satisfaça a equação da conservação da massa. O fato de ρ

não variar com P introduz uma dificuldade para tratar o acoplamento entre a pressão e a velocidade. Esta formulação é chamada de incompressível (Maliska, 2004)

O procedimento de avanço da solução do instante t para o instante $t + \Delta t$ é dado por:

- Fornecem-se os valores iniciais das variáveis dependentes, faz-se o cálculo de T , ρ , e P , através da equação da energia, $\rho = \rho(T)$ e de um algoritmo respectivamente;
- Calcula-se as componentes do vetor velocidade, usando as equações do movimento, verifica-se as velocidades satisfazem à equação da conservação da massa. Caso não satisfaçam, voltar e recalculer a pressão, a temperatura depende das velocidades, portanto deve-se recomeçar o processo;
- Após a convergência, avançar novo intervalo de tempo, até que o regime permanente seja alcançado ou até atingir-se o tempo de simulação desejado.

Existem vários métodos para o cálculo da pressão. O método SIMPLE é um dos mais usados e discutidos na literatura, tendo sido desenvolvido por Pantankar e Spalding, 1972. Consiste em fazer uma correção para a pressão, obedecendo à equação da continuidade, seguida de uma correção da velocidade. Nos métodos para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade, a seqüência de cálculo envolve dois passos distintos: no primeiro, as velocidades são corrigidas de maneira a satisfazer a equação da conservação da massa; no segundo, as pressões são avançadas para completar o ciclo iterativo. No método SIMPLE, as equações para a correção das velocidades são obtidas a partir das equações do movimento. Uma das vantagens desse método é o fato de não ser necessária a solução de um sistema linear para determinar a pressão. Entretanto, a velocidade de convergência é baixa.

O método SIMPLE possui algumas variações como o SIMPLER ou SIMPLE Revisado, o SIMPLEC ou SIMPLE Consistente (Maliska, 2004).

2.3 Fluidodinâmica Computacional

Fluidodinâmica computacional (*CFD*) é o termo dado ao grupo de técnicas matemáticas, numéricas e computacionais, usadas para obter, visualizar e interpretar soluções computacionais para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse de um dado escoamento. A origem dessas equações de conservação é a teoria de fenômenos de transporte. Portanto pode-se dizer que *CFD* é o conjunto das técnicas de simulação computacional usadas para prever os fenômenos físicos ou físico-químicos que ocorrem em escoamentos que podem ser relacionados com a ação e a interação de fatores como dissipação, difusão, convecção, ondas de choque, superfícies escorregadias, condições de contorno e turbulência. No campo da aerodinâmica todos esses fenômenos são governados pela equação de Navier-Stokes. A maioria dos aspectos importantes dessas relações é não-linear e, como consequência, não possuem soluções analíticas (Fontes et al., 2005).

É importante ressaltar que simulações em *CFD* possuem limitações. Na maioria dos casos é necessário o desenvolvimento de modelos mais acurados como, por exemplo, nas áreas de turbulência, radiação combustão, escoamentos multifásicos, etc. A aplicação de condições de contorno necessita do desenvolvimento de ferramentas cada vez melhores para descrever em detalhe a geometria do domínio de cálculo. Existe a necessidade constante de aperfeiçoamento das técnicas numéricas para ampliar a capacidade de resolução dos problemas mais complexos.

O uso de métodos numéricos para solução de equações diferenciais parciais introduz uma aproximação que pode mudar a forma básica dessas equações. Como as equações não são precisamente iguais às originais, elas podem e provavelmente irão, simular os fenômenos físicos não exatamente da mesma forma que as equações básicas fariam. Matematicamente, essas diferenças se referem aos erros de truncamento. Não obstante, a teoria resultante da análise numérica da fluidomecânica foi desenvolvida predominantemente por cientistas interessados na física do fluxo de fluido e como consequência, esses erros são freqüentemente identificados em associação a um fenômeno físico particular. Os erros causados pelas aproximações numéricas resultam em equações diferenciais parciais com termo adicional que pode ser identificado como dissipação ou dispersão. Assim, a maioria dos métodos numéricos usados para resolver equações de Euler não-dissipativas cria uma equação

diferencial parcial modificada que produz alguma forma de dissipação. Porém se usados e interpretados corretamente, esse métodos podem fornecer informações úteis.

Se os efeitos dos erros de truncamento não são minuciosamente entendidos e controlados, eles podem levar a sérias dificuldades, produzindo resultados distantes do fenômeno físico real.

O primeiro passo na resolução de problemas envolvendo a fluidodinâmica computacional é a especificação do problema, incluindo geometria, condições de fluxo, e as necessidades da simulação. A geometria pode resultar de medidas de uma configuração existente ou pode ser associada com o estudo do desenho. Um conjunto de objetivos e limitações deve ser especificado. As condições de fluxo devem ser incluídas, como por exemplo, o número de Reynolds, e o número de Mach para o fluxo na camada de ar. As necessidades das simulações envolvem questões como nível de precisão desejada, o tempo requerido, e a solução dos parâmetros de interesse.

Uma vez que o problema foi especificado, apropriadas equações e condições de contorno devem ser escolhidas. Geralmente se aceita que no campo da fluidodinâmica os fenômenos são governados pela conservação da massa, do momento e da energia. As equações diferenciais parciais resultantes dessas leis de conservação referem-se às equações de Navier-Stokes. Estas equações são resolvidas em volumes de controle, que são escolhidos arbitrariamente, desde que estes contenham o fenômeno de interesse.

De modo a fornecer um meio mais fácil de resolver e analisar problemas de escoamentos de fluidos, a grande maioria de programas computacionais de *CFD* é subdividida em cinco elementos principais: um gerador de geometria, um gerador de malha, um pré-processador, um processador que obtém a solução e um pós-processador.

2.3.1 Gerador de Geometria

De acordo com o site *cfid-online*, a primeira informação a ser introduzida no ambiente computacional para resolver um problema de *CFD* é o domínio onde se buscará a solução do problema. Esse domínio normalmente é introduzido através dos

programas de CAD (*Computer Aided Design*) que permitem modelar qualquer objeto no espaço tridimensional.

2.3.2 Gerador de Malha

Depois de criado o domínio é necessário dividi-lo em pequenos subdomínios não sobrepostos, chamados elementos, pois a solução das equações de transporte pelos métodos numéricos envolve cálculos em subdomínios. Este processo é chamado de geração de malha (*grid* ou *mesh*).

Existem basicamente dois tipos de malhas: as estruturadas e as não-estruturadas. As malhas estruturadas são geradas pela subdivisão dos eixos coordenados em pequenos elementos unidimensionais, cujo produto cartesiano gera elementos bidimensionais e tridimensionais que são, geralmente, quadriláteros e hexaédricos, respectivamente. Nessas malhas, cada elemento tem sempre o mesmo número de elementos vizinhos, a não ser quando o mesmo pertence ao contorno.

As malhas não estruturadas são formadas por elementos que podem ter diversas formas. Em problemas bidimensionais, os elementos são polígonos: triângulos, quadriláteros, pentágonos etc, sendo mais comum o uso de triângulos. No caso tridimensional, os elementos são poliedros: tetraedros, pirâmides, prismas, hexágonos etc, sendo os tetraedros os mais usados. Essas malhas conseguem representar mais facilmente as geometrias mais complexas, devido à maior flexibilidade de forma que seus elementos podem assumir.

A precisão da solução em um problema de *CFD* depende do número de elementos e como estes estão distribuídos na malha. Em geral, a precisão da solução melhora com o aumento do número de elementos da malha. Contudo, é necessário balancear a precisão da solução através do refinamento da malha com o custo computacional de se obter a solução no hardware disponível (CFD-online.com).

2.3.3. Pré-Processamento

Consiste na modelagem física de um problema de escoamento com a estruturação destas informações de forma que o solver possa usá-las. A modelagem física envolve as seguintes informações:

- Seleção dos fenômenos físicos e/ou químicos que serão modelados e simulados;
- Definição das propriedades dos fluidos, como viscosidade, densidade, condutividade térmica, etc.;
- Especificação das condições de contorno apropriadas nos elementos da malha associados ao contorno do domínio.

Os pré-processadores mais recentes fornecem um banco de dados com as propriedades físicas dos fluidos mais comuns e permitem ao usuário evocar diversos modelos físicos e químicos como: modelos de turbulência, transferência de calor radiante, transferência de massa, reações químicas etc, já implementados no código ou ainda permitir a implementação de novos modelos.

2.3.4. Solvers

É a parte principal de um pacote de *CFD* pois ele implementa as técnicas numéricas de solução e seus parâmetros para resolver os problemas físicos do modo apropriado. Resumidamente, os métodos numéricos que formam a base do *solver* passam pelos seguintes passos:

- Aproximação das variáveis incógnitas do escoamento através de funções simples;
- Discretização, pela substituição das aproximações mencionadas acima nas equações de transporte que governam o escoamento, com manipulações matemáticas subseqüentes;
- Linearização do sistema de equações algébricas resultantes;
- Definição da estratégia de solução do sistema de equações algébricas lineares;

— Solução dos sistemas de equações algébricas lineares.

Existem várias técnicas numéricas de solução e suas diferenças estão associadas à forma com que as variáveis incógnitas são aproximadas e ao procedimento de discretização. Todas essas metodologias numéricas levam a sistemas de equações lineares (com matrizes cheias ou esparsas) com um grande número de equações e, portanto, uma abordagem numérica para a solução de tal sistema se torna necessária.

2.3.5. Pós-Processamento

Assim como no pré-processamento, um grande esforço de desenvolvimento no campo do pós-processamento foi realizado nos últimos anos. Devido aos avanços tecnológicos em *software* e *hardware* gráficos, os principais pacotes CFD estão equipados com ferramentas versáteis para visualização de campos escalares e vetoriais, incluindo:

- Visualização da geometria e da malha;
- Gráficos de vetores;
- Gráficos de contorno;
- Gráficos sobre superfícies no espaço tridimensional;
- Visualizações de linhas de fluxo e de trajetórias das partículas.

A maioria dessas ferramentas também inclui a possibilidade de criar animações para facilitar a análise do resultado. Em adição às diferentes formas de visualização, todos os códigos oferecem arquivos de resultados em diferentes padrões, que podem ser exportados para outro *software* de visualização.

2.4 O Método *Multigrid*

Os métodos iterativos ponto a ponto não possuem boas taxas de convergência, quando malhas refinadas são utilizadas, porque os erros de baixa frequência não conseguem ser eliminados pelo algoritmo com boa taxa de convergência.

A anisotropia dos coeficientes é uma das razões que indica a necessidade de algum tipo de aceleração nos métodos iterativos tipo Gauss-Seidel, pois este método é eficiente apenas na redução dos erros de alta frequência, ou seja, aqueles com comprimento de onda da ordem do tamanho da malha (Maliska, 2004).

Existem duas classes de métodos *multigrid*: os geométricos cuja aglomeração dos volumes é feita com base na malha, e os algébricos, cuja aglomeração é feita considerando a anisotropia dos coeficientes, que engloba os dois efeitos, pois a relação de dimensões e as propriedades físicas aparecem nos coeficientes.

A idéia básica de aceleração da convergência por métodos *multigrid* é reconhecer que os métodos iterativos ponto a ponto conseguem eliminar os erros com comprimento de onda da ordem do tamanho da malha. Assim, usando malhas desde bem refinadas até bem grosseiras, com poucos volumes no domínio, os erros estariam sendo eliminados em todas as frequências, acelerando o processo de convergência. O procedimento é conceitualmente simples, bastando identificar na malha fina a direção na qual os coeficientes são dominantes e, nesta direção, criar uma malha mais. O procedimento para se obter uma malha mais grosseira a partir de uma malha mais fina pode ser visto em Maliska (2004).

CAPÍTULO 03

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os ciclones constituem-se em equipamentos simples e baratos de remover partículas de correntes gasosas. Em geral, existem dois tipos de ciclones, o de fluxo contínuo e o mais comum de fluxo reverso. Neste último, a corrente gasosa circula espiralmente em sentido descendente da entrada em direção ao vértice da seção cônica, onde as partículas são depositadas e, então, a partir daí o fluxo é revertido, tornando-se ascendente, através do vórtex, indo para saída axial de gás.

Esses equipamentos têm sido utilizados desde o século XIX para separar partículas sólidas em escoamentos de suspensões fluido-partículas.

Nas últimas décadas, muitos pesquisadores, entre eles, Barth, (1956); Dietz, (1981); Bloor e Ingham, (1987); Iozia e Leith, (1990); têm dado maior atenção aos ciclones industriais, e modelos têm sido desenvolvidos para determinar os parâmetros-chave de performance, tais como curvas da eficiência de separação e queda de pressão pelo ciclone.

3.1 Eficiência de coleta

A eficiência de coleta de partículas de um ciclone depende da sua geometria, propriedades físicas do gás e das partículas, e das condições de operação.

Há muitos estudos teóricos e experimentais para se determinar a eficiência de coleta dos ciclones. A teoria de Lapple é a mais usada das teorias de corte. Lapple assumiu que as partículas que entram no ciclone são igualmente distribuídas pela entrada. A partícula que é coletada com 50% de eficiência possui o assim chamado diâmetro de corte (dpc), (Lapple, 1951) .

No modelo de Barth (1956), a velocidade terminal é calculada para as partículas estáticas, baseadas no balanço exato entre a força centrífuga e de arraste. A

eficiência de coleta para qualquer partícula é determinada pela razão da velocidade do fluido com a velocidade terminal da partícula.

Leith e Licht (1972), desenvolveram outra aproximação para a modelagem de ciclones bastante difundida, assumindo que a turbulência mantém constante a concentração das partículas a qualquer altura do ciclone. Esta teoria permite o cálculo direto da eficiência de coleta para partículas de qualquer tamanho em qualquer modelo de ciclones, entretanto existe evidência experimental da ocorrência de gradientes de concentração na direção radial.

Uma teoria híbrida desenvolvida por Dietz (1981) divide o ciclone em três regiões: a entrada, fluxo descendente ou anular, e fluxo ascendente ou centro. Dietz assumiu que a turbulência produz um perfil de concentração radial para partículas que não foram coletadas dentro de cada região.

Dirgo e Leith (1985) modificaram a teoria de Barth e encontraram uma expressão simples para o gráfico de Barth para a eficiência de coleta versus a razão do diâmetro da partícula em relação ao diâmetro de corte.

Mothes e Löffler (1984) estenderam os conceitos de Dietz em diferentes regiões de fluxo dentro do ciclone para incluir uma quarta região próxima à saída de sólidos, e consideraram também uma difusividade turbulenta finita tanto na região de fluxo ascendente como descendente. Essa aproximação evita a descontinuidade presente no modelo de Dietz (1981) e o transporte das partículas em ciclones é então vista como uma imposição do movimento difusivo com um deslocamento médio determinístico.

Iozia e Leith (1990) baseados na teoria de Lapple (1951) e Barth (1956) propuseram uma função lógica para descrever a eficiência fracional para ciclones com geometrias que eram variações do ciclone Stairmand de alta eficiência.

Clift et al (1991) modificaram a estimativa do tempo médio de residência do gás e obtiveram a equação da eficiência baseada nas suposições originais da teoria de Leith e Licht (1972).

Kim e Lee (1997) propuseram uma teoria para ciclones de alta eficiência baseada nas características da camada limite. Esta teoria divide o ciclone em duas partes, a região turbulenta e a próxima à parede. Na região turbulenta, as trajetórias das partículas são calculadas a partir do movimento médio do fluido e a probabilidade de coleta das partículas que estão na região próxima à parede é calculada em função da velocidade de deposição resultante da difusão turbulenta e da força centrífuga.

A eficiência pode aumentar quando a concentração de sólidos aumenta, pois as partículas mais grossas carregam as mais finas para a circunferência do ciclone, onde elas são coletadas (Fassani e Goldstein 2000). Para determinar a influência da concentração de sólidos na eficiência de coleta, Mothes e Löffler (1984) mediram-na com várias concentrações de sólidos pesando as partículas no funil, Hoffman et al, (1992) também obtiveram a eficiência dessa maneira. Zhao e Pfeffer (1997) , mostraram que a eficiência total poderia ser obtida usando a expressão da eficiência de um ciclone simplesmente mudando o diâmetro de partícula pelo diâmetro mássico médio das partículas de uma dada distribuição.

A maioria das teorias anteriores considera somente a região central, desprezando a camada limite próxima à parede. De acordo com Kim e Lee (2001), a velocidade na camada limite formada na parede do ciclone tem um importante papel como barreira para a deposição das partículas devido à diminuição da força centrífuga próxima à parede. Então eles desenvolveram um modelo para pequenos ciclones onde a difusão turbulenta na região central do fluxo e o movimento das partículas dentro da camada limite são considerados. As curvas de eficiência obtidas apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

De acordo com Hoffman (2002) Muschelknautz (1970) melhorou a teoria de Barth (1956), considerando os efeitos de concentração das partículas, da rugosidade da parede, do fluxo secundário, e da mudança na distribuição de partículas dentro do ciclone na eficiência de coleta e na queda de pressão.

Avcı (2003) desenvolveram um modelo para calcular o diâmetro de corte e as eficiências fracionais em separadores ciclônicos, considerando os efeitos do fluxo, parâmetros geométricos e aceleração das partículas, assumindo que a mistura do fluido com as partículas é homogênea. Os resultados mostraram boa concordância com os dados experimentais para diferentes tipos de ciclones. Foi feita também a comparação deste modelo com as correlações empíricas existentes na literatura, mostrando mais uma vez que este modelo está apto para determinar a performance de coleta.

Zhao (2005), desenvolveu um método de avaliação da eficiência, baseado na investigação do modelo do fluxo e nas teorias de separação do tamanho crítico da partícula e de separação da camada limite. Porém, nesse trabalho não foram considerados fatores como os efeitos do carregamento de partículas na entrada, a re-

entrada das partículas e algumas dimensões do ciclone, incluindo o tubo do vórtex e o cone.

3.2 Queda de pressão

Um outro parâmetro importante nos ciclones é a queda de pressão, que diminui quando as partículas são introduzidas no fluxo. Este fenômeno foi atribuído a inércia da partícula, que tenderia a igualar o momento do gás nas camadas adjacentes, na direção do fluxo do gás (Fassani e Goldstein 2000).

O conhecimento da perda de carga do ciclone é um dos itens necessários para o cálculo do consumo de energia e a otimização dos parâmetros do ciclone.

A queda de pressão total consiste nas perdas na entrada, na saída e dentro do ciclone. A principal parte da queda de pressão é atribuída às perdas dentro do ciclone devido à dissipação de energia pelo tensor de viscosidade do fluxo rotacional turbulento (Ogawa, 1997). O restante é causada pela contração do fluxo de fluido na saída, expansão na entrada e fricção do fluido na superfície da parede do ciclone.

Uma das primeiras teorias da queda de pressão foi proposta por Shepherd e Lapple (1939), partindo da equação de Bernoulli:

$$\Delta P = \xi \frac{\rho V_e^2}{2} \quad (3.1)$$

Onde ξ é um fator constante para cada tipo de ciclone, V_e é a velocidade de entrada do gás e ρ é a densidade do gás com o pó.

Shepherd e Lapple (1939) foram os primeiros a abordar o efeito da concentração de sólidos na queda de pressão, observando que a mesma diminui com o aumento da concentração de sólidos. Eles atribuíram esse fato à inércia das partículas que quando entram em movimento perpendicular ao escoamento do gás, tende a equalizar a quantidade de movimento do gás em camadas adjacentes. Shepherd e Lapple (1939), também foram pioneiros numa equação para avaliar ξ :

$$\xi = 16 \frac{a b}{De^2} \quad (3.2)$$

Fornecendo a queda de pressão em N/m^2 , sendo a , b , De , as dimensões do ciclone especificadas na Figura 3.1.

Linttlejohn, ((1978) apud Bernardo (2005)), afirma que se a vazão do gás for mantida constante, quando iniciada a alimentação dos sólidos, ocorrerá uma grande transferência do momento do gás para os sólidos, produzindo-se o arraste.. Portanto, a velocidade do gás se reduz e com isso a queda de pressão diminuirá. As partículas depositadas na parede são a causa da redução na queda de pressão (Yuu et al (1978) apud Bernardo (2005)).

3.3 CFD e ciclones

A fluidodinâmica computacional (CFD), é uma técnica emergente para modelagem do escoamento em sistemas gás-sólido. A modelagem em CFD baseia-se no modelo euleriano para sistemas gás-sólido, que consiste em tratar as partículas como uma fase contínua. Esta técnica tem um grande potencial para prever as características do campo de fluxo e da trajetória das partículas dentro de um ciclone, como também a queda de pressão, reversão de fluxo, zonas de circulação e efeitos de turbulência.

Um dos pioneiros trabalhos para modelar o escoamento em ciclones usando CFD, foi o de Boysan et al. (1982). Neste trabalho foi usado o modelo euleriano-lagrangeano, e desconsiderou-se a influência da fase particulada na fase fluida, sendo a geometria do sistema bidimensional. Os autores apresentaram também o desacoplamento das fases para o escoamento em fase diluída. O modelo de turbulência usado foi o $k-\epsilon$ padrão (Lauder et al., 1974) com os tensores algébricos de Rotta (1951) e Rodi (1976), utilizando o método dos volumes finitos. Os resultados obtidos foram comparados com os existentes na literatura, sendo que as eficiências foram comparadas com as obtidas por Stairmand (1951) e por Mothes et al. (1981). Desta forma, os autores conseguiram resultados satisfatórios para prever o escoamento de gás, queda de pressão e perfis de velocidade tangencial e axial, além da eficiência de coleta.

Alguns anos depois, Pericleous (1987) apresentou um trabalho para modelar hidrociclones, utilizando as equações de Navier-Stokes para descrever velocidades de mistura e as equações de transporte para o ar e a concentração das partículas. O modelo de turbulência usado foi baseado na teoria do comprimento de mistura de Prandtl, e os tensores de Reynolds foram modelados segundo um meio isotrópico. A

pesquisa foi realizada usando um código comercial de CFD, PHOENICS, que utiliza o método dos volumes finitos para escoamento multidimensional, bifásico, assumindo que o escoamento era estacionário, bidimensional e axissimétrico. O modelo é aplicável a qualquer tipo de hidrociclone e também a ciclones a ar. O modelo mostrou-se adequado para prever perfis de velocidade, distribuição das partículas, assim como a queda de pressão e a eficiência de coleta.

Duggins e Frith (1987) apresentaram um trabalho com o objetivo de melhorar o conhecimento do escoamento em ciclones, principalmente em relação ao fenômeno da turbulência, que é causado pelo intenso movimento giratório do gás. Os autores observaram que quando considerado um componente giratório de velocidade no escoamento, os perfis de velocidade mudavam consideravelmente em relação aos casos onde esse movimento giratório não era considerado. Portanto atribuíram a este giro uma redução significativa da transferência líquida de energia, causando a diminuição da taxa de dissipação de turbulência, e um aumento na escala de turbulência próximo ao eixo de rotação. O modelo proposto considerou a anisotropia dos tensores de Reynolds, modificando o modelo $k-\varepsilon$ padrão, utilizando duas viscosidades turbulentas, variando em magnitude ao longo do campo de escoamento. A viscosidade para as equações de momento radial e axial foi calculada através do modelo $k-\varepsilon$ padrão, enquanto que a viscosidade tangencial foi calculada por uma expressão para o comprimento de mistura. Este trabalho mostrou que o modelo $k-\varepsilon$ padrão não descreve adequadamente o pico de velocidade tangencial entre a parede interna do ciclone e o eixo de simetria. O problema desta modificação do modelo $k-\varepsilon$ padrão, é que a expressão para o comprimento de mistura utiliza uma constante empírica adicional. A solução deste modelo foi feita através de um código de CFD denominado CHAMPION 2/E/FIX, para escoamentos bidimensionais.

Zhou e Soo (1990), apresentaram um modelo que desprezava os efeitos das partículas sobre a fase fluida, desconsideravam os efeitos térmicos e o efeito tridimensional causado pelo bocal de entrada do ciclone. Foi empregado o método dos volumes finitos para a solução das equações do modelo, sendo que o acoplamento pressão-velocidade foi resolvido usando o método SIMPLE com um algoritmo de iteração linha por linha denominado TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*). Para descrever o fenômeno da turbulência foi utilizado o modelo $k-\varepsilon$. Este trabalho mostrou avanços no estudo do comportamento do escoamento de ar no interior do

ciclone, avaliando queda de pressão, perfis de velocidade, turbulência e eficiência de coleta. As medidas experimentais foram feitas utilizando o medidor *Laser Doppler Velocimeter* (LDV). Eles buscaram também avaliar a eficiência, queda de pressão, e os perfis de velocidade, quando adicionada uma barra ao longo do eixo de simetria do equipamento. Os resultados apresentaram boa concordância com os dados experimentais. A principal contribuição desse trabalho foi a avaliação da influência da presença da barra no eixo de simetria, pois esta reduziu a queda de pressão em 1/3, e o pico de velocidade tangencial foi deslocado em direção a parede do ciclone aumentando a eficiência de coleta.

No mesmo ano, Baskakov et al (1990), avaliaram a queda de pressão, e também o fenômeno de transferência de calor de um ciclone operando em duas situações diferentes: uma corrente de ar contendo particulados, e outra corrente de ar, mas sem os particulados. Os resultados mostraram que o perfil de temperatura da corrente gasosa é influenciado pela presença de partículas no escoamento. Quando há presença de sólidos na corrente, a temperatura aumenta em todas as seções radiais do ciclone, pois a fase sólida move-se em sentido descendente, transferindo uma grande quantidade de calor para a parte cônica. Já, quando não há sólidos na corrente gasosa, a temperatura do gás diminui à medida que a corrente de gás escoar no sentido descendente, devido à perda de calor nas paredes do ciclone. Foi estudada também a concentração de sólidos presentes na fase gasosa. O aumento da concentração de sólidos fez com que as partículas se aglomerassem nas paredes do ciclone, diminuindo assim sua interação com o gás e a influência na vorticidade, ocorrendo uma redução na queda de pressão. Porém, este efeito não foi linear, visto que a queda de pressão volta a aumentar com o aumento da concentração de sólidos na corrente de gás.

Dyakowsky et al. (1993) realizaram um estudo para modelar o escoamento turbulento de um hidrociclone, para isso analisaram escoamentos estacionários, turbulentos e axissimétricos. O modelo proposto foi o $k-\varepsilon$ combinado com as equações para os tensores de Reynolds. Este trabalho fez uma revisão daquele proposto por Saffman (1974), incluindo a consideração da anisotropia da viscosidade turbulenta. O escoamento foi caracterizado como rotacional e com velocidade constante, sendo aplicado o modelo de zero-equações de Speziale (1991) no método analítico, sem considerar o efeito da fase sólida na fase fluida. Eles consideraram dois

casos: o primeiro considerou a ausência de uma sonda no interior do hidrociclone e o segundo considerou a presença desta e a sua influência nas propriedades do escoamento. Foi utilizada uma malha numérica deslocada, para as velocidades axial e radial. Os resultados mostraram concordância com os dados experimentais para pequenos ciclones de 10 mm de diâmetro. Para o caso da presença da sonda no interior do ciclone, foi observado um aumento na velocidade tangencial. Então os autores concluíram que como a velocidade tangencial diminui mais rapidamente no processo com a sonda do que no processo com vórtex forçado, a quantidade de partículas pequenas carregadas pela corrente de saída poderia diminuir, aumentando assim a eficiência de captação.

No trabalho de Cristea et al. (1994) foi apresentado um estudo de simulação tridimensional em um ciclone. Foi utilizado pela primeira vez um código comercial de simulação o FLUENT 4.2. Neste trabalho foi avaliado o refinamento da malha, esquemas de discretização e modelo de turbulência. Como o modelo $k-\varepsilon$ padrão não comporta os efeitos anisotrópicos da viscosidade turbulenta, os autores utilizaram o modelo dos tensores de Reynolds para a turbulência. O efeito de interação partícula-partícula não foi considerado. Foi concluído que o refinamento da malha não influencia na distribuição dos componentes axial e radial da velocidade. Os resultados tiveram uma boa concordância com os dados experimentais, em relação à velocidade média e flutuante e performance, mas com relação ao vórtex do escoamento foram encontradas algumas diferenças nos resultados obtidos. Estes resultados são válidos apenas para escoamentos multifásicos diluídos.

Silva e Nebra (1994) modelaram um escoamento tridimensional, não-isotérmico, turbulento em ciclones, tratando a fase sólida como meio contínuo. Foi testado o comportamento do modelo usando diferentes equações para o coeficiente de convecção. Para a realização dos testes foram utilizados o método dos volumes finitos e o método SIMPLEC para o acoplamento pressão – velocidade.

Hoffmann et al. (1995) destacaram que o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ não pode ser usado para escoamento em ciclones. Eles também compararam o modelo de turbulência ASM (modelo das tensões algébricas) usado por Dyakowski e Willians (1993) com o de Boysan et al (1982) e observaram que o modelo ASM fornecia piores resultados que o de Boysan et al (1982), além de grande dificuldade de convergência. Neste trabalho foi utilizado um coletor de sólidos e os autores

concluíram que este possui influência sobre o perfil de velocidades e na eficiência de coleta. As equações foram resolvidas usando o método dos volumes finitos e diferenças finitas.

Avareous et al (1997) realizaram um estudo sobre a trajetória e o mecanismo de classificação das partículas, em baixas concentrações, em hidrociclones, utilizando o código comercial FLUENT e o modelo dos tensores de Reynolds (RSM) para a turbulência. Eles desenvolveram um modelo probabilístico para a trajetória das partículas, baseando-se no fato de que a probabilidade de encontrar a partícula após certo intervalo de tempo é igual a uma curva Gaussiana de excentricidade que é dada pela integração das equações de movimento das partículas e de extensão à translação radial turbulenta característica. Portanto, computa-se iterativamente a difusão desta partícula numa distribuição de probabilidade numa malha para cada intervalo de tempo depois da injeção de cada partícula. Com este modelo de probabilidade foram obtidos ótimos resultados para as mudanças nos parâmetros como viscosidade, geometria e condições de entrada.

Meier (1998) estudou o comportamento dos ciclones através de três tipos de modelos. No primeiro, considerou-se que a fase sólida não exercia influência na fase fluida, analisando fenômenos como reversão de escoamento, zonas de circulação, efeitos do coletor de sólidos. No segundo, as partículas foram consideradas como esféricas, possuindo então um diâmetro constante, e também que quando todas elas estão juntas, se comportam como um fluido invíscido, admitindo assim os efeitos da fase sólida sobre a fase fluida na queda de pressão e na atenuação da vorticidade. No terceiro modelo, através do acoplamento de dois modelos, o EEBB (Euleriano Bifásico Bidimensional), utilizado no segundo modelo, com o EELB (Euleriano – Euleriano – Lagrangeano Bidimensional), pode-se, considerando o efeito da fase sólida sobre a fase gasosa, prever a trajetória das partículas, de acordo com o seu diâmetro. A partir daí, pode-se fazer a previsão da eficiência do ciclone. Para a solução dos modelos, desenvolveu-se um programa computacional, que utilizava volumes finitos e o método SIMPLEX para o acoplamento de pressão – velocidade, com uma malha deslocalizada. Concluiu-se que o método usado, é adequado para a melhoria no estudo do escoamento em ciclones, no que diz respeito à baixa queda de pressão e alta eficiência.

Novamente, Cristea et al. (1998) estudaram o comportamento dos ciclones, através de uma simulação 3D. Simularam-se os componentes vetoriais da velocidade,

queda de pressão, e eficiência de coleta. Para o estudo da turbulência foi utilizado o modelo RSM (*Reynolds Stress Model*) e para o acoplamento pressão-velocidade foi usado o sistema SIMPLEC com o esquema de interpolação UPWIND. Como havia grande concentração de sólidos na fase fluida, adotou-se um modelo Euleriano – Lagrangeano para o escoamento bifásico disperso. Através dos resultados obtidos, que apresentaram boa concordância com relação às componentes da velocidade média, pode-se determinar a influência da velocidade flutuante das fases contínua e descontínua, observando regiões de formação de vórtice e zonas de recirculação.

Meier e Mori (1998) simularam um escoamento gás-sólido diluído num ciclone, através de um modelo fluidodinâmico computacional. Foi utilizado o modelo de turbulência k- ϵ para prever a viscosidade turbulenta dos tensores de Reynolds da fase fluida. Para os tensores tangenciais foi usada a teoria do comprimento de mistura de Prandtl, e na previsão do turbilhão na parede foi usada uma função de parede. Na fase sólida a viscosidade foi considerada constante e com a finalidade de testar este modelo foram usados dois tipos de escoamentos, um com ar sem partículas e outro com partículas num escoamento diluído. Devido à presença de partículas no escoamento foi observada a redução na queda de pressão, sendo a redução do pico de velocidade tangencial responsável por esta queda. Concluíram também através do modelo utilizado que os tensores de Reynolds se comportam anisotropicamente.

Hoeskstra et al. (1999) fizeram um estudo sobre o escoamento em ciclones, sem considerar a influência da fase sólida no escoamento, com o intuito de avaliar modelos de turbulência, sendo estes modelos o k- ϵ padrão, o RNG-k- ϵ (*Re-Normalization Group*) e o modelo RSTM (*Reynolds Stress Transport Model*). Para realizar a medida dos componentes das velocidades tangencial e axial, foi utilizada a técnica LDV (*Laser Doppler Velocimeter*). Foram testados ciclones com diferentes diâmetros do duto de saída de gás. Foi concluído através dos resultados deste trabalho, que o diâmetro do duto de saída de gás influencia muito nas características do escoamento, aumentando as velocidades axial e tangencial. Para a simulação foi usado o código computacional FLUENT V4.47 que usam o método dos volumes finitos, uma malha de 15000 células e esquema de interpolação *quick*, tendo como resultado que tanto o modelo k- ϵ quanto o modelo RNG k- ϵ , quando usados para diâmetros grandes de duto de saída de gás, obtiveram resultados acima dos encontrados experimentalmente, sendo que o modelo RNG k- ϵ não pode prever a distribuição do vórtice livre na região de saída do escoamento. Já o modelo RSTM

mostrou-se apto para reproduzir os perfis de velocidade tangencial. Neste trabalho os autores não levaram em conta parâmetros como eficiência e queda de pressão.

Meier e Mori. (1999) fizeram uma comparação entre dois modelos de turbulência: o isotrópico $k-\epsilon$ e o anisotrópico feito pela combinação do modelo $k-\epsilon$ com o modelo de comprimento de mistura de Prandtl. Foi empregada a fluidodinâmica computacional para resolver este problema, com o método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade, e uma malha numérica deslocada. A anisotropia dos tensores de Reynolds foi considerada para a fase fluida e para a fase sólida considerou-se um fluido invíscido. Como resultado deste estudo, concluiu-se que o modelo $k-\epsilon$ padrão não descreve bem o escoamento turbulento, porém o modelo anisotrópico mostrou-se apto para prever o comportamento do escoamento turbulento, apontando as zonas de recirculação, alta preservação do vórtice, escoamento descendente, reversão de escoamento, e os efeitos gerados pelo sistema coletor de sólidos no escoamento. Além disso, os resultados de simulação apresentaram boa concordância com os dados experimentais de eficiência global e comportamento da fração de sólidos.

Montavon et al. (2000) utilizaram a fluidodinâmica computacional para analisar o fluxo em ciclones e hidrociclones, usando os modelos de turbulência $k-\epsilon$ padrão e o modelo dos tensores de Reynolds (RSM). Para isto foi construída uma malha hexaédrica utilizando o gerador de malha ICM Hexa para o hidrociclone e o CYCGEN para o ciclone a gás. O ciclone testado foi o Stairmand de alta eficiência. Através dos resultados, os autores concluíram que com relação à queda de pressão ambos os modelos testados possuem uma boa concordância com os dados experimentais, sendo que apenas para o hidrociclone, o modelo dos tensores de Reynolds mostrou melhores resultados. As simulações foram feitas com o software CFX 5.

Hoffmann et al (2001), estudaram a influência do comprimento (H) do corpo do ciclone na eficiência e na queda de pressão. Eles realizaram testes experimentais em ferramentas de CFD. A variação do comprimento (H) do ciclone foi de 0.67 a 1.37 metros, variando-se o comprimento da seção cilíndrica. Na simulação, foi usado um pacote de CFD, com esquema de interpolação 2D SUDS . O modelo de turbulência usado, foi um híbrido entre o modelo algébrico dos tensores e um modelo completo dos tensores de Reynolds. A eficiência cresceu com o aumento do comprimento do ciclone, porém quando este ultrapassa $(H-S)/D = 5.65$, a eficiência diminui

dramaticamente. Os autores acreditam que esta queda na eficiência é resultado do posicionamento do vórtex quando o comprimento do ciclone é aumentado. A queda de pressão diminui com o aumento do tamanho do ciclone, pois quando o ciclone é aumentado, aumenta-se também o fator de fricção na parede, diminuindo a intensidade da rotação, causando um decréscimo na queda de pressão, efeito esse semelhante ao caso do aumento do carregamento dos sólidos (Hoffmann et al. (1991)). Os resultados obtidos através da fluidodinâmica computacional mostraram-se em concordância com os aqueles obtidos experimentalmente.

Peres et al. (2002) avaliaram um modelo anisotrópico de turbulência, o DSM (*Diferencial Stress Model*) para estudar o escoamento em ciclones, experimental e numericamente. Foi utilizado o CFX 4.4 para a simulação, e na parte experimental foi determinada a distribuição radial dos componentes da velocidade tangencial através de dados de pressão. Os resultados obtidos mostraram boa concordância com os dados experimentais, porém ocorreram problemas quanto a convergência e estabilidade na solução numérica, que podem ser minimizados escolhendo-se procedimentos apropriados de solução.

Derksen (2003) estudou a eficiência de um ciclone Stairmand de alta eficiência através de ferramentas de CFD. Para isto foi usado o modelo LES (*Large-Eddy Simulations*) para a turbulência. Este trabalho baseou-se nos dados experimentais obtidos por Hoekstra (1999), e os resultados obtidos foram satisfatórios. Os autores concluíram que a amplitude da precessão do vórtex depende de sua posição axial no ciclone; o seu máximo é alcançado próximo da entrada da caixa coletora de sólidos. Na entrada do *finder*, o fluxo de gás exibe uma quebra de vórtex que força a maioria do gás a entrar no tubo de saída através da parede interna. No escoamento usando o modelo LES, observando a distribuição da concentração das partículas, foi observado que há uma competição entre os efeitos centrífugos e de dissipação associada à turbulência. Esta competição determina se as partículas têm chance de alcançar a região central do ciclone onde elas serão captadas pela corrente de saída. Eles relataram também que as regiões que contém a conexão do canal de entrada para o corpo do ciclone, bem como o *finder* são decisivos para o comportamento de separação das partículas maiores que o diâmetro de corte.

Noriler et al. (2004) apresentaram um equipamento para reduzir a queda de pressão em ciclones. Este equipamento foi baseado no princípio de que a queda de pressão é influenciada diretamente pelo pico de velocidade tangencial. Então, a idéia

foi diminuir esse pico, dividindo o vórtex em dois vórtices opostos no *finder* por duas entradas no formato de espiral que produzem um choque entre as linhas de corrente, aumentando assim a pressão estática do sistema. Para isso foi utilizado o método dos volumes finitos com uma estrutura de multiblocos num sistema co-ordenado generalizado para a malha numérica. Para o acoplamento pressão-velocidade foi usado o algoritmo numérico SIMPLEC como um esquema de interpolação *higher upwind*, o modelo de turbulência usado foi uma combinação do modelo híbrido k- ϵ com o modelo de comprimento de mistura de Prandtl devido à anisotropia dos tensores de Reynolds. Os ciclones testados foram o Lapple e o Stairmand. Com isto eles obtiveram uma redução de 20% na queda de pressão, apresentando efeitos positivos na eficiência, pois a região de alta velocidade foi deslocada para a região próxima à parede concentrando o campo centrífugo.

Corrêa et al. (2004) analisaram experimental e numericamente o tempo de residência das partículas dentro do ciclone usado como secador. Foi utilizado o CFX 4.4 para a simulação, os modelos de turbulência empregados foram o k- ϵ tradicional, o modificado, o RNG k- ϵ e o modelo de tensores diferenciais (DSM). Nesse caso, a influência da fase sólida na fase fluida não foi considerada. Para o acoplamento da pressão-velocidade foi usado o método SIMPLE *Consistent*, esquema de interpolação *upwind* e as equações foram resolvidas com o algoritmo AMG (*Algebraic Multi-Grid*). Os autores concluíram que a variável de maior influência no tempo de residência é a concentração volumétrica de sólidos. Os estudos experimentais mostraram que o diâmetro da partícula também influencia o tempo de residência das partículas em ciclones.

Bernardo (2005) utilizou as técnicas de CFD para estudar o escoamento em ciclones, usando os pacotes CFX e FLUENT, esquema de interpolação *upwind* e o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade, sendo que para a turbulência foram usados os modelos DES (*Detached Eddy Simulation*), LES (*Large Eddy Simulation*) e o RSM (*Reynolds Stress Model*), todos mostrando bons resultados na predição das características do escoamento. Um estudo dos escoamentos monofásicos e bifásicos, revelou uma boa concordância com os dados experimentais. Foram realizados também estudos com mudanças geométricas, mudança no ângulo de seção de entrada com bons resultados nas características de escoamento, redução na queda de pressão e aumento na eficiência de coleta. Variou-se também o diâmetro do *finder*, obtendo-se um aumento na eficiência de coleta.

Gimbun et al. (2005) apresentaram um trabalho para avaliar a influência da temperatura e da velocidade de entrada na queda de pressão em ciclones. Para isto, eles utilizaram o código computacional FLUENT 6.1. Para corroborar os dados obtidos, estes foram comparados com correlações empíricas. O modelo de turbulência usado foi o RNG k- ϵ . O modelo proposto se mostrou apto para a avaliação da influência da temperatura e da velocidade de entrada, pois apresentou boa concordância entre os perfis de temperatura e velocidade e os calculados empiricamente. Observou-se que a queda de pressão é diretamente proporcional à velocidade e inversamente proporcional à temperatura.

Narashima et al. (2005) fizeram a modelagem de hidrociclones utilizando ferramentas de CFD, através do código FLUENT. Para a turbulência foi usado o modelo k- ϵ padrão. Os autores obtiveram resultados simulados em boa concordância com os dados experimentais. E concluíram que um pequeno aumento na taxa de fluxo de alimentação melhora a eficiência aumentando a força centrífuga nas partículas, e reduzindo o diâmetro de corte (dpc).

Xiang et al. (2005) estudaram o escoamento de ciclones de diferentes alturas através da fluidodinâmica computacional. Para isto foi utilizado o código FLUENT 5.5, e o modelo RSM (*Reynolds Stress Model*), as malhas construídas para a simulação tinham de 34000 a 60000 células hexaédricas dependendo da altura do ciclone. Os resultados mostraram que a velocidade tangencial diminuiu quando a altura do ciclone é aumentada, portanto em ciclones “grandes” a eficiência de coleta é baixa.

Portanto, no passado o estudo de ciclones era basicamente experimental, resultando em correlações empíricas, nas quais não eram considerados efeitos de turbulência, nem a interação fluido-partícula. Com o desenvolvimento dos computadores, a modelagem matemática ganhou papel fundamental no estudo de escoamentos turbulentos multifásicos, destacando-se a CFD como uma importante ferramenta de pesquisa.

CAPÍTULO 04

MODELAGEM MATEMÁTICA

No presente capítulo, será apresentada a modelagem matemática aplicada na realização dos experimentos numéricos. Também se discutirá sobre o modelo de turbulência usado.

O fluxo de fluido e partículas no ciclone é um problema de escoamento bifásico, e as interações fluido-partículas na interface podem ter um papel importante na fluidodinâmica deste problema.

Aqui será apresentado resumidamente o modelo geral de Meier (1998), onde se considera a influência da fase fluida sobre a fase particulada.

4.1 Modelo Geral de Meier (1998)

De acordo com Meier (1998), no domínio do contínuo todas as fases envolvidas são consideradas como matéria contínua. A hipótese da interpenetrabilidade das fases completa a abordagem do contínuo, analisando-se as fases de maneira que as mesmas ocupem o mesmo volume no espaço (no caso, a célula da malha numérica) ao mesmo tempo. Assim, as propriedades de transporte para todas as fases podem ser calculadas num mesmo ponto no espaço ao mesmo tempo, através de uma média volumétrica (Zhou, 1993).

As equações de conservação podem ser escritas num referencial euleriano, a partir do teorema do transporte (Slaterry, 1972). Para uma fase genérica k , considerando que não haja flutuação no campo gravitacional e na massa específica para todas as fases envolvidas, e também aplicando a média temporal a suas propriedades, temos:

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

Onde: ρ_k é a massa específica da fase k , t é o tempo e v_k é o campo vetorial instantâneo de velocidade.

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

Onde f_k é a fração volumétrica total ocupada pela fase k , Q_k é a vazão volumétrica, e n o número de fases envolvidas.

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

$$\frac{\partial(\rho_k f_k v_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_k f_k v_k v_k) = -f_k \nabla p_k - f_k \nabla \cdot (T_k^{(l)}) + \rho_k f_k g - (F_{res})_k \quad (4.3)$$

com $k = 1, \dots, n_r$

Onde p_k é a pressão atuante sobre a fase k , g o campo gravitacional, $(T_k^{(l)})$ a tensão de cisalhamento de origem molecular sobre o fluido real, $(F_{res})_k$ a força de atrito da fase k e n_r o número das fases envolvidas.

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

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

A diferença entre as equações do movimento para os fluidos reais e os ideais está associada ao fato de que os fluidos ideais não possuem uma tensão de natureza molecular ou viscosa. Esta tensão está associada aos choques entre as partículas. Com relação ao termo de pressão, alguns autores o desprezam na fase particulada (Zhou, 1993).

Hinze, 1995 estabeleceu um tratamento conhecido como decomposição de Reynolds, para abordagem estatística da turbulência, que estabelece que para cada propriedade instantânea de estado do sistema está associada uma média e uma flutuação instável e resultante de um processo turbulento. Portanto, associando uma média e uma flutuação a cada grandeza instantânea presente no modelo fluidodinâmico médio volumétrico, tem-se a seguinte representação genérica:

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

Onde ξ representa qualquer propriedade instantânea (v_k , f_k , etc.), $\bar{\xi}$ é o valor médio e ξ' representa a flutuação turbulenta da propriedade.

Na caracterização do modelo geral, de Meier (1998) adota a média temporal como premissa estatística para a aplicação da decomposição de Reynolds. Sendo as principais propriedades da média temporal as seguintes:

$$\begin{aligned} - \quad \overline{\nabla \xi} &= \nabla \bar{\xi}; \\ - \quad \overline{\xi'} &= 0; \\ - \quad \overline{\xi' \gamma'} &\neq 0, \text{ sendo } \gamma \text{ uma propriedade genérica;} \\ - \quad \overline{a \cdot \xi} &= a \cdot \bar{\xi}; \\ - \quad \overline{\xi + \gamma} &= \bar{\xi} + \bar{\gamma}; \end{aligned} \quad (4.6)$$

Assim, aplicando a decomposição de Reynolds nas equações de conservação instantâneas e considerando que não haja flutuação no campo gravitacional e na massa específica para todas as fases envolvidas, e aplicando a média temporal e suas propriedades listadas nas equações 4.6, temos:

— Conservação da massa:

$$\frac{\partial (\overline{\rho_k f_k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\overline{\rho_k f_k v_k}) + \nabla (\overline{\rho_k f_k' v_k'}) = 0 \quad (4.7)$$

— Conservação da quantidade de movimento para fluidos reais:

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

— Conservação da quantidade de movimento para fluidos ideais:

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

As equações apresentadas acima representam o modelo fluidodinâmico geral, tendo, basicamente, as seguintes características:

- Modelo multifásico, composto por fluidos reais e ideais;
- Euleriano para todas as fases;
- escoamento turbulento para todas as fases;
- Como o componente viscoso é inferior ao tensor turbulento de Reynolds, a flutuação do tensor viscoso seria de pouca importância, assim:

$$\frac{\partial(\overline{\rho_k f'_k v'_k})}{\partial t} \approx \left[\left(\overline{2 v'_k f'_k v'_k} + \overline{f_k v'_k v'_k} \right) \right] \approx \overline{f'_k} \nabla p'_k \approx \overline{f'_k} \nabla (T_k^{(l)}) \approx (\overline{F'_{res}})'_k \approx 0 \quad (4.10)$$

4.1.1 Características do Modelo Geral de Meier (1998)

O modelo geral de Meier, é também conhecido como modelo euleriano-euleriano multifásico bidimensional (EEMB), e tem a seguinte estrutura:

- Equações de conservação da massa e da quantidade de movimento;

- Relações de fechamento: modelos de turbulência, modelo empírico para o coeficiente de interface, condições iniciais e de contorno, propriedades físicas e de transporte, propriedades geométricas, funções de parede;
- Hipóteses simplificadoras: compressibilidade da fase k , transferência da quantidade de movimento associada à dispersão turbulenta de massa é negligenciada, força gravitacional atuando somente na direção axial do ciclone.

4.2 Modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional

Este modelo possui as seguintes simplificações em relação ao modelo EEMB:

- Presença de uma fase fluida real e de uma fase particulada ideal;
- A fase particulada é caracterizada geometricamente pelo diâmetro médio das partículas;
- escoamento diluído, de forma que o tensor de Reynolds sob a fase particulada pode ser desprezado, conferindo um escoamento com viscosidade da fase sólida constante;
- O fluxo turbulento de massa é negligenciado nas fases, devido a sua magnitude em relação aos termos convectivos.

O modelo de Meier (1998) aqui apresentado, serve como base a abordagem tridimensional.

4.3 Modelos de turbulência

4.3.1 Modelo k - ϵ padrão

O modelo k - ϵ padrão é um modelo de viscosidade turbulenta no qual se assume que os tensores de Reynolds são proporcionais aos gradientes de velocidade média, com a constante de proporcionalidade sendo caracterizada pela viscosidade turbulenta, μ_t , que é dada pela equação abaixo:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.11)$$

C_μ é uma constante, que pode assumir os seguintes valores: 1,44, 1,92 e 0,09. No caso de modelo de turbulência k- ε padrão, o valor usado de C_μ é o de 0,09.

O modelo é dado pelas equações de transporte para a energia cinética de turbulência (k) e a taxa de sua dissipação turbulenta (ε):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4.13)$$

$$G_k = -\rho \bar{v}_i' \bar{v}_j' \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (4.14)$$

Nestas equações, G_k representa a geração da energia cinética de turbulência resultante da média dos gradientes de velocidades; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ são constantes sendo que σ_k e σ_ε são os números de Prandtl turbulentos para k e ε , respectivamente. A viscosidade de turbulência é dada pela Equação (4.6). As constantes $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k e σ_ε assumem os seguintes valores: $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Como o modelo k- ε padrão considera a isotropia para a viscosidade turbulenta, é pouco recomendável no tratamento de escoamentos altamente turbulentos.

Em simulações tridimensionais com processos reais as predições do modelo k- ε padrão não são corroboradas, contribuindo apenas para análises e testes numéricos monofásicos em fases iniciais de testes.

4.3.2 Modelo RNG k-ε (*Re-Normalization Group*)

Este modelo é similar ao k-ε padrão, empregando a seguinte expressão para relacionar a tensão com a velocidade média do fluido:

$$\tau^{ij} = -\frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} + \mu_t \left(\frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right) \quad (4.15)$$

Sendo δ_{ij} o delta de Kronecker.

A viscosidade de turbulência μ_t é dada pela equação abaixo:

$$\mu_t = \mu \left[1 + \sqrt{\frac{C_\mu \rho k}{\mu \varepsilon}} \right]^2 \quad (4.16)$$

O valor de C_μ utilizado é um pouco abaixo do valor da mesma constante no modelo k-ε, sendo empregado o valor de 0,0845.

A equação da energia cinética é dada por:

$$\rho v^j \frac{\partial k}{\partial x^j} = \alpha \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\mu_{\text{efetivo}} \frac{\partial k}{\partial x^i} \right) + P - \rho \varepsilon \quad (4.17)$$

Sendo,

$$P = \mu_{\text{efetivo}} \left(\frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right) \frac{\partial v^i}{\partial x^j} \quad (4.18)$$

Onde μ_{efetivo} é definido como anteriormente, e $\alpha = 1,39$.

A taxa de dissipação é dada segundo:

$$\rho v^j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x^j} = \alpha \frac{\partial}{\partial x^i} \left(\mu_{\text{efetivo}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x^i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4.19)$$

Sendo,

$$R = \rho \frac{C_\mu \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3 k} \quad (4.20)$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij}^2} \quad (4.21)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v^i}{\partial x^j} + \frac{\partial v^j}{\partial x^i} \right) \quad (4.22)$$

Onde R é a taxa de tensão que possui um importante papel na anisotropia, e as constantes têm os seguintes valores: $C_{1\varepsilon} = 1,42$; $C_{2\varepsilon} = 1,68$; $C_\mu = 0,0845$; $\beta = 0,011 - 0,015$ e $\eta_0 = 4,38$.

A renormalização de grupos melhora a caracterização da viscosidade turbulenta a partir do modelo k - ε padrão, pois tenta amenizar as não-conformidades do modelo k - ε com sua hipótese de viscosidade turbulenta isotrópica.

4.3.3 Modelo RSM (*Reynolds Stress Model*)

Uma das maiores limitações do modelo k - ε padrão é que a viscosidade turbulenta é isotrópica. Isto implica que as escalas de velocidade e comprimento são as mesmas em todas as direções. Em escoamentos altamente turbulentos, estas escalas variam com a direção. Portanto para este tipo de escoamento, o modelo k - ε padrão é inadequado, podendo produzir resultados incorretos. O modelo RSM computa os tensores de Reynolds individualmente e conseqüentemente fornece resultados melhores.

O modelo RSM é baseado em equações de transporte para todos os componentes do tensor de Reynolds e para a taxa de dissipação.

Foram desenvolvidas equações diferenciais para cada componente dos tensores de Reynolds e a sua solução fornece os componentes do tensor. Essas equações apresentam a seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho \overline{v_i v_j}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (V_k \rho \overline{v_i v_j}) = P_{ij} + \phi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{2}{3} c_s \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \frac{\partial \rho \overline{v_i v_j}}{\partial x_k} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon \rho \quad (4.23)$$

Onde, ϕ_{ij} é a correlação de força de pressão, k é a energia cinética turbulenta, ε é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, V é a velocidade média e P é o termo de produção, que é dado por:

$$P = -\rho \left(\overline{v \cdot v} (\nabla V)^T + (\nabla V) \overline{v \cdot v} \right) \quad (4.24)$$

A equação para a dissipação turbulenta é da seguinte forma:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \frac{\varepsilon}{k} (c_{\varepsilon 1} P - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\sigma_{\varepsilon RS}} \left(\mu + \rho C_{\mu RS} \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] \quad (4.25)$$

Neste trabalho os valores adotados para as constantes neste trabalho foram:

$$c_s = 0,22; \quad c_{\varepsilon 1} = 1,45; \quad c_{\varepsilon 2} = 1,90; \quad C_{\mu RS} = 0,1152$$

Os valores das constantes variam de acordo com o tipo do modelo RSM adotado. Nesta dissertação foi usado o modelo desenvolvido por Launder, Reeci e Rodi (1975), denominado de RSM-LRR.

CAPÍTULO 05

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com as simulações do ciclone tipo Lapple considerando um escoamento gás-sólido em geometria tridimensional.

Os estudos foram procedidos em três etapas. De início foi considerado um ciclone de 0,254m de diâmetro; posteriormente, foram realizados testes de refinamento com diferentes malhas numéricas; e finalmente, foram feitas simulações com um ciclone com diâmetro de 0,127m. Inicialmente, o diâmetro de 0,254m foi escolhido por corresponder a uma dimensão real comumente utilizada para ciclones em plantas piloto de FCC (*fluid catalytic cracking*) para a produção da gasolina. Posteriormente, o diâmetro foi reduzido à metade visando a economia no custo computacional.

Para todos os testes realizados, foi considerado ar a condições nas condições *standart* de temperatura e pressão (0 °C e 1atm), e partículas com características típicas de um catalisador: diâmetro médio ($dp_{\text{médio}}$) de $7.6.10^{-6}$ m, densidade (ρ) de 1550kg/m^3 , sendo que para todos os ciclones simulados não foi considerada a caixa coletora de sólidos.

As simulações foram efetuadas segundo as condições de contorno descritas na Tabela 5.1, adotando-se um esquema de interpolação *upwind* de segunda ordem e RSM (*Reynolds Stress Model*) para a turbulência, para todos os casos estudados. As condições de saída adotadas foram do tipo *opening* tanto na saída de sólidos como na saída de gás, sendo a direção do fluxo estabelecida como normal ao plano de saída onde a pressão é prescrita. Esta condição é utilizada quando o fluxo pode ser tanto para fora como para dentro do domínio. O sentido do fluxo ao longo desse plano é dado como resultado dos cálculos. O critério de convergência adotado foi de 5.10^{-4} entre as iterações numéricas, e condições de parede de *no slip*, para o ar, que é a condição onde o fluido próximo à parede assume velocidade da parede, que é zero por definição; e *free slip* para as partículas, que é utilizada quando a tensão de

cisalhamento na parede é zero, e a velocidade do fluido próxima à parede não é reduzida pelo efeito da fricção.

Tabela 5.1: Condições de contorno no ciclone.

Parâmetros	Entrada	Saída de gás	Saída de sólidos
V_i [m/s]	15,2	-	-
X_{ar}	0,9999	-	-
$X_{partículas}$	0,0001	-	-
$P_{relativa}$ [Pa]	-	0	0

Onde X_{ar} e $X_{partículas}$ é a fração volumétrica dos fluidos.

As simulações foram processadas num *cluster* de dez máquinas, sendo cada uma delas dotadas de um processador Pentium 4 2,4 gigahertz, com 1024MB de memória RAM.

5.1 Simulações Preliminares com Ciclone de 0,254m de diâmetro

Foram realizadas duas simulações para este caso. A primeira delas foi feita com o diâmetro de corte $d_{pc} = 3,70\mu\text{m}$ calculado a partir da Equação (2.1), e a segunda com um diâmetro arbitrário de partícula de $2,25\mu\text{m}$.

A malha numérica para este caso possui 70439 elementos tetraédricos (Figura 5.1). Como o número de elementos de malha é relativamente pequeno, o tempo simulado foi de 12 segundos, sendo o tempo computacional de aproximadamente 20 horas, observando-se continuamente o fluxo de sólidos na saída e a queda de pressão, até que esses valores permanecessem constantes.

A Figura 5.2 mostra a distribuição da fração volumétrica de sólidos no interior do ciclone ao final de 12 segundos, com um diâmetro médio de partículas de $3,70\mu\text{m}$.

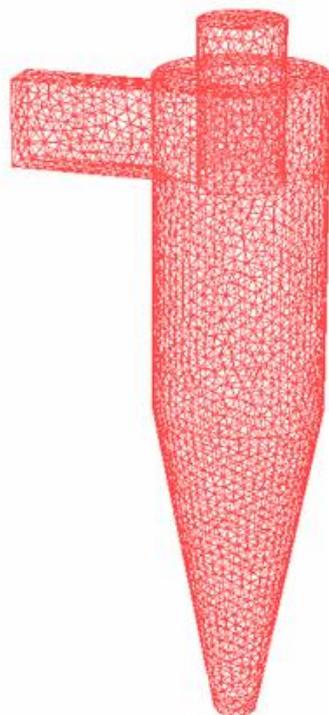


Figura 5.1: Malha tetraédrica

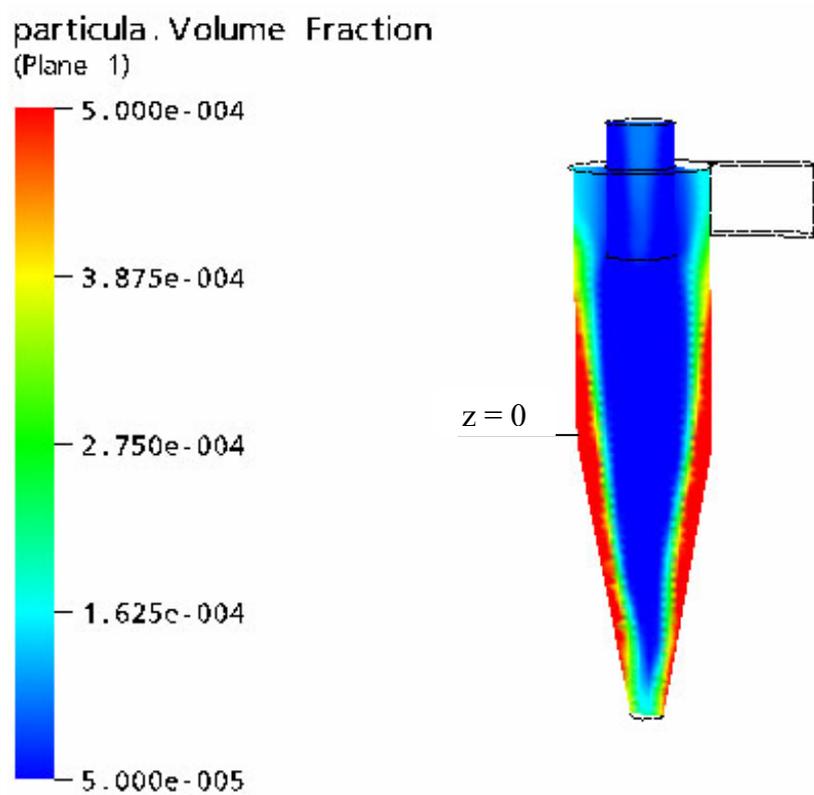


Figura 5.2: Distribuição da fração volumétrica de sólidos no interior do ciclone para $d_p = 3,70\mu\text{m}$

Para a visualização das diferentes regiões na Figura 5.2, foi necessário utilizar uma faixa de valores baixos para a fração de sólidos, pois o escoamento é altamente diluído. Observando a Figura 5.2 pode-se constatar que a maior parte dos sólidos se concentra junto à parede do ciclone, de acordo com o fenômeno físico no equipamento, pois as partículas devem ser abatidas junto à parede do ciclone a fim de serem coletadas.

A eficiência de coleta, calculada pela Equação 2.2, foi de 85,6%. Este valor deveria ser de 50%, segundo a teoria de Lapple. Isto sugere que melhorias na malha devem ser necessárias, como será demonstrado adiante.

Para o caso de partículas um pouco menores ($d_p = 2,25\mu\text{m}$), a distribuição da fração volumétrica de sólidos é semelhante à anterior, como mostrado na Figura 5.3, porém com menor concentração de sólidos na parte cônica inferior, sendo a eficiência de coleta menor para o menor diâmetro de partícula.

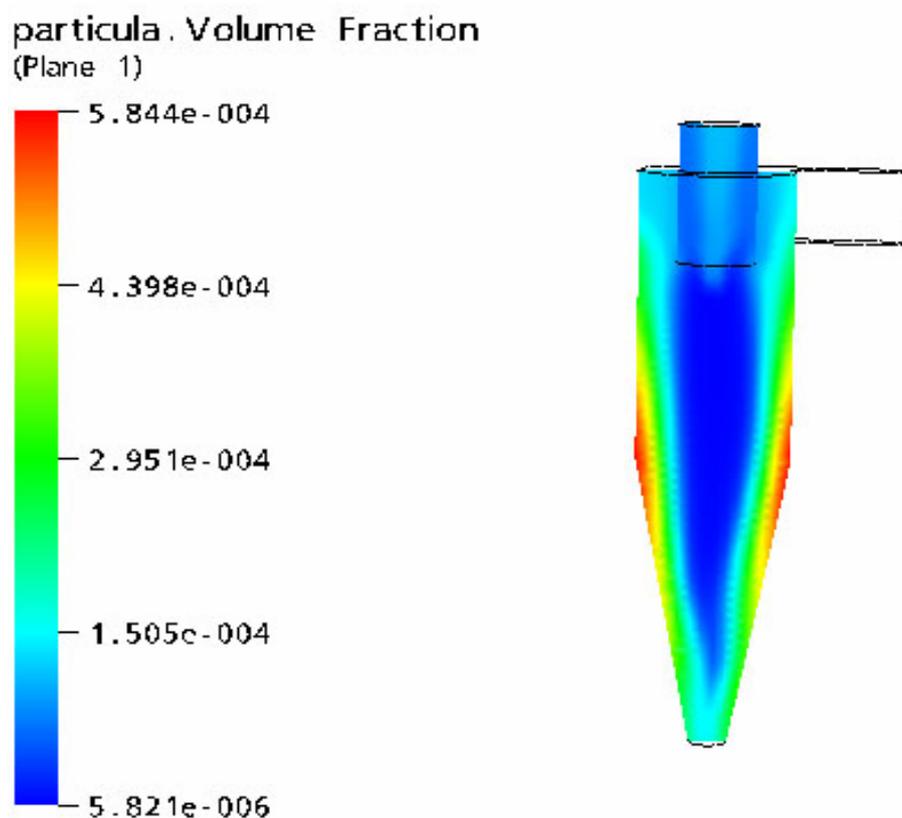


Figura 5.3: Distribuição da fração volumétrica de sólidos para $d_p = 2,25\mu\text{m}$.

Para esses casos, as eficiências de coleta simulada e aquelas indicadas por Lapple são mostradas na Tabela 5.2:

Tabela 5.2: Diâmetro médio de partículas e eficiência de coleta

dp (μm)	m_{entrada} (kg/s)	$m_{\text{saída s\u00f3lid}}$ (Kg/s)	$m_{\text{saída g\u00e1s}}$ (kg/s)	Eficiência (%)	Lapple (%)
3,7	0,01889	0,01617	0,00365	85,6	50
2,25	0,01889	0,01225	0,00704	64,85	31

Os valores das eficiências indicadas por Lapple est\u00e3o representados pela curva da Figura 5.26. Nas simula\u00e7\u00f5es a vaz\u00e3o m\u00e1ssica de s\u00f3lidos na sa\u00edda superior do g\u00e1s foi menor para as part\u00edculas maiores, o que mostra coer\u00eancia com o comportamento esperado, visto que as menores part\u00edculas s\u00e3o mais facilmente arrastadas para a sa\u00edda do g\u00e1s.

A Figura 5.4, mostra a distribui\u00e7\u00e3o de press\u00e3o dentro do ciclone. Mesmo com part\u00edculas de diferentes di\u00e2metros, o comportamento da press\u00e3o foi o mesmo para ambos os ciclones.

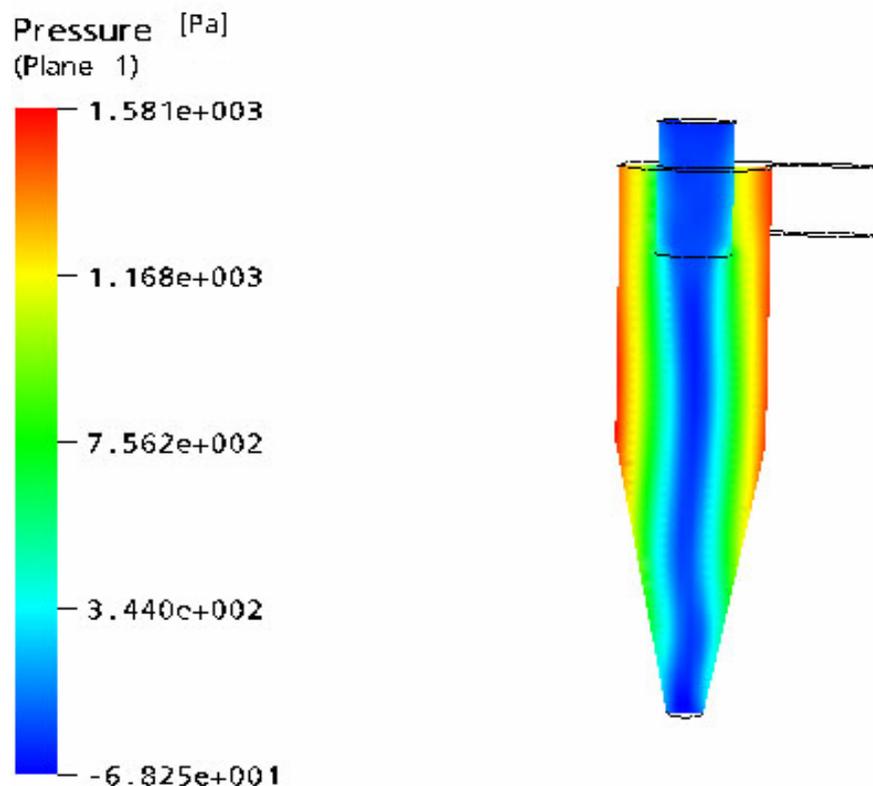


Figura 5.4: Distribui\u00e7\u00e3o da press\u00e3o ao longo do ciclone.

Na Figura 5.4 pode ser observado que a região de menor pressão encontra-se distribuída axialmente ao longo do ciclone, onde a partir de uma altura média ocorre a reversão do fluxo. Também é notada certa uniformidade de pressão nas regiões próximas à parede do ciclone, conforme observado por Bernardo (2005) para esse tipo de escoamento.

Os valores simulados da queda global de pressão foram de 1533Pa e 1890Pa, para os casos com diâmetro de partícula de 3,70 μm e 2,25 μm , respectivamente. A queda de pressão foi maior para partículas menores, em sintonia com a teoria de que o tamanho da partícula influi na transferência da quantidade de movimento; partículas menores levam a uma redução da velocidade tangencial do gás e, por conseguinte, a um aumento da queda de pressão.

De acordo com a teoria de Shepherd e Lapple (1939), a queda de pressão global pode ser determinada segundo uma correlação empírica baseada em dados experimentais. A Tabela 5.3, apresenta os valores da queda de pressão obtidos das simulações e aqueles da teoria de Lapple, de acordo com as Equações 3.1 e 3.2, e também os desvios percentuais entre esses valores.

Tabela 5.3: Queda de pressão global através do ciclone

dp (μm)	$\Delta P_{\text{simulada}}$ (Pa)	ΔP_{Lapple} (Pa)
3,7	1532,73	1329,75
2,25	1885,22	1329,75

A diferença entre os valores da queda de pressão simulados e de Lapple se deve provavelmente à presença dos sólidos no escoamento que produz uma influência sensível sobre a pressão, diferentemente da teoria de Lapple que considera apenas os parâmetros geométricos do ciclone. O cálculo da queda de pressão realizado nas simulações, considerou a diferença de pressão entre a entrada do ciclone e a saída inferior de sólidos.

Observando-se a distribuição de velocidade axial do gás, na Figura 5.5, pode-se constatar que a região de reversão do escoamento coincide com a região de baixa pressão mostrada anteriormente na Figura 5.4.

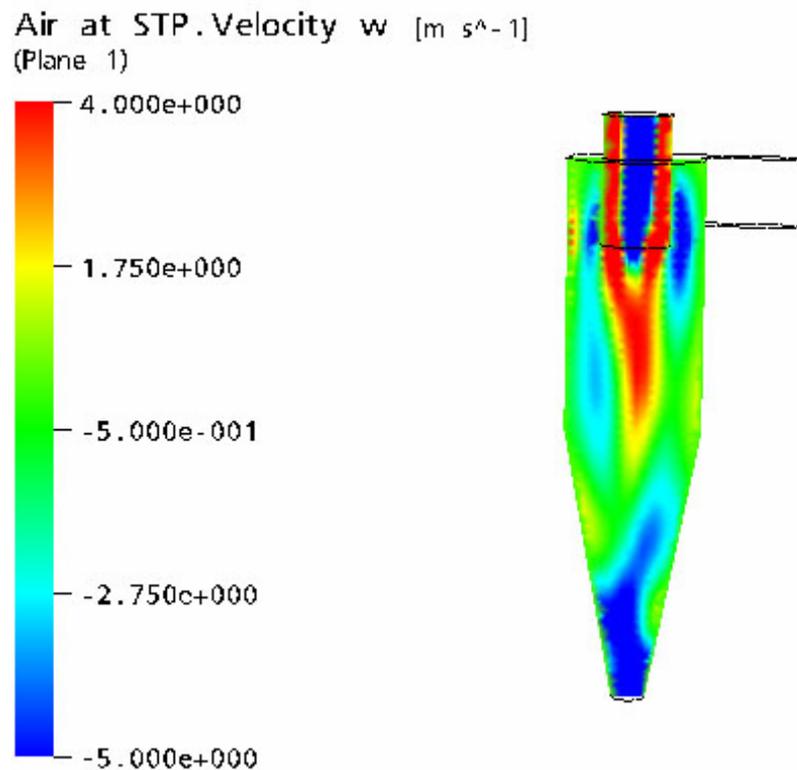


Figura 5.5: Distribuição de velocidades axiais do gás ao longo do ciclone

A Figura 5.6 abaixo, mostra a distribuição de velocidades tangenciais do gás. O resultado obtido, é semelhante àquele de Bernardo (2005), mostrando um comportamento adequado ao fenômeno físico do escoamento gás-sólido em ciclones. A região de maior velocidade é onde ocorre a reversão do escoamento.

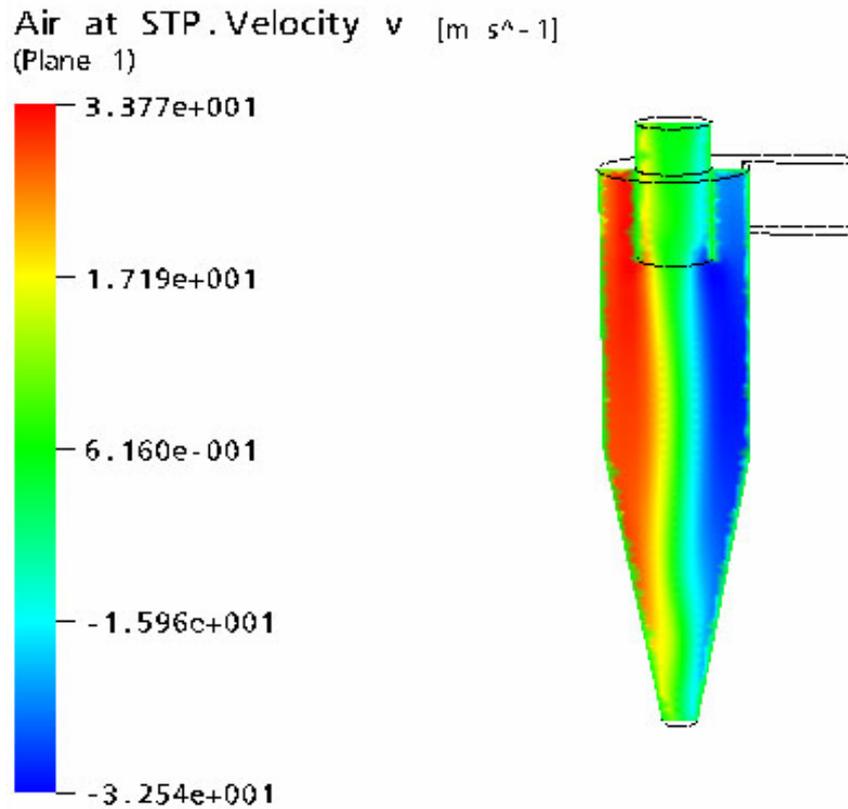


Figura 5.6: Distribuição de velocidades tangenciais do gás ao longo do ciclone

O comportamento observado da distribuição de velocidades do gás e das partículas foi o mesmo para os dois casos testados. Pode-se constatar através da Figura 5.7, que, devido à hipótese do contínuo e da interpenetrabilidade das fases, a velocidade máxima das partículas está situada próximo às paredes, onde a sua concentração também é máxima.

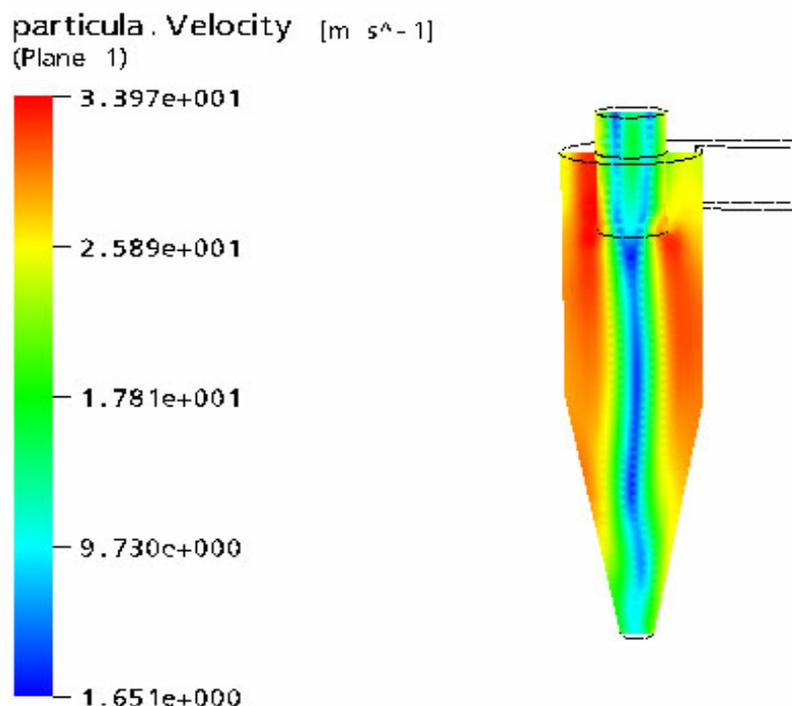


Figura 5.7: Distribuição de velocidade total das partículas.

Como há poucos sólidos na região de saída superior do gás (Figura 5.2), o valor relativamente alto da velocidade nessa região, deve-se ao fato que algumas partículas de menores diâmetros são arrastadas para a saída de gás. Através da Figura 5.7 pode-se também observar que a velocidade das partículas é mínima na região central do ciclone.

Em todos os casos estudados, mostrou-se a queda de pressão durante as simulações, constatando-se que esta ficava constante quando a vazão de sólidos se estabilizava. A Figura 5.8 mostra a evolução da queda de pressão ao longo do tempo para partículas com diâmetro de 2,25 μ m.

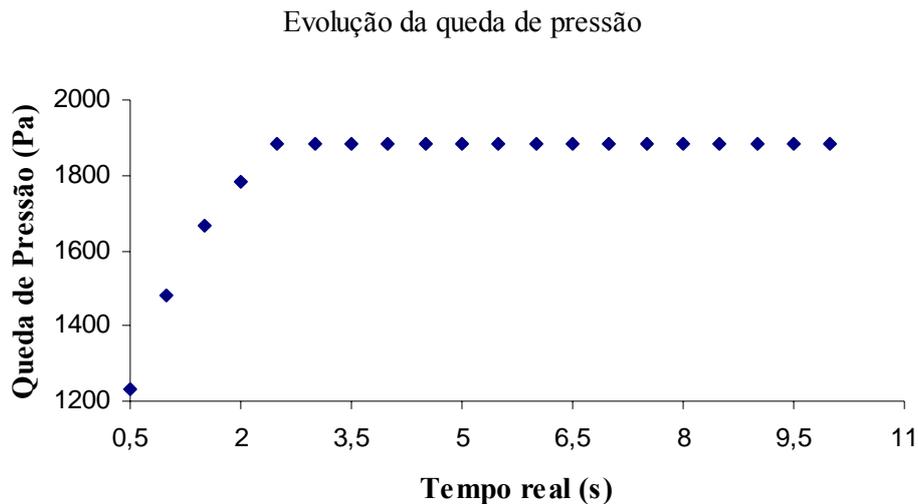


Figura 5.8: Gráfico da variação da queda de pressão em função do tempo real de simulação para $dp = 2,25\mu\text{m}$.

Para partículas com diâmetro de $3,70\mu\text{m}$ a queda de pressão ficou constante a partir de um tempo real de 4,5 segundos, com comportamento semelhante ao caso com diâmetro menor de partículas.

5.2 Estudo de refinamento e aperfeiçoamento da malha numérica

Nas primeiras simulações as eficiências obtidas apresentaram um desvio relativamente grande em relação àquelas indicadas por Lapple (1951). Assim procurou-se melhorar a malha visando diminuir os efeitos de difusão numérica de forma a obterem-se resultados mais acurados. A Figura 5.9, mostra a malha tetraédrica sem a adição da camada prismática.

Para o refino da malha foram adicionados elementos prismáticos junto à parede do ciclone, e junto à parede do *finder*. Essas regiões foram escolhidas por apresentarem grandes gradientes de concentração de sólidos e de velocidade de escoamento.

A Figura 5.10 mostra a fração de sólidos no plano XY na posição $z = 0,45\text{m}$, sem o refino da malha, para o diâmetro de corte do ciclone. Pode-se observar uma larga região de elevada concentração de sólidos junto à parede do ciclone e que se atenua gradativamente à medida que se progride em direção ao *finder*.

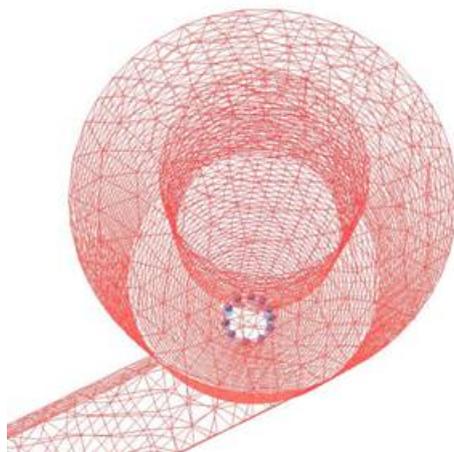


Figura 5.9: Malha tetraédrica sem adição da camada de prismas

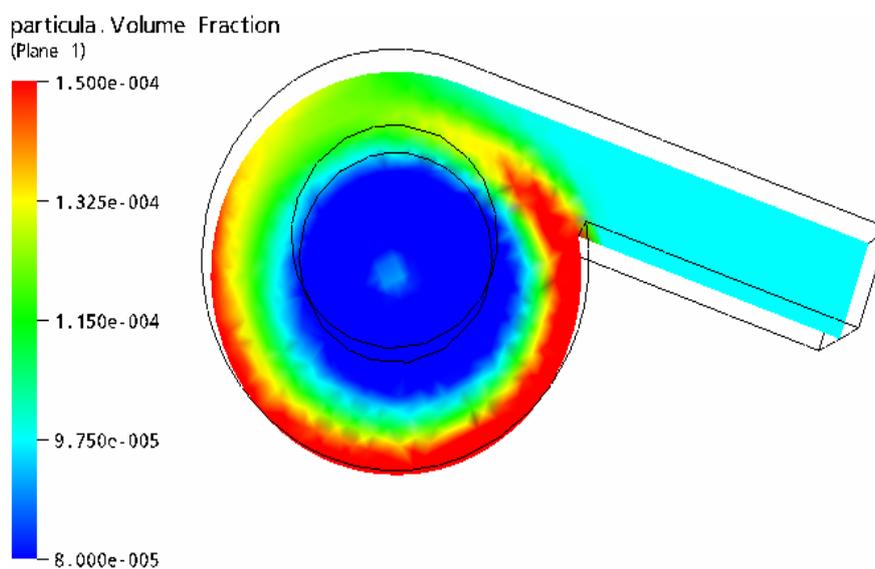


Figura 5.10: Distribuição da fração volumétrica de sólidos no plano XY na posição $z = 0,45\text{m}$

O efeito de suavização dos gradientes de concentração pela difusão numérica pode ser visualizado na Figura 5.11, onde se apresenta o perfil da fração volumétrica das partículas no eixo X na altura do *finder*.

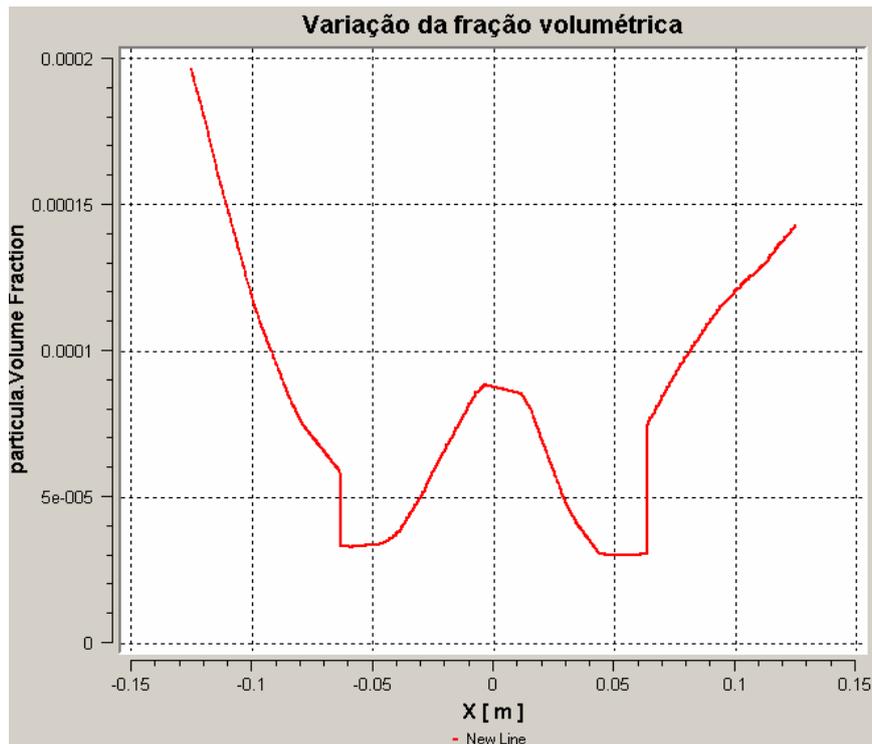


Figura 5.11: Perfil da fração volumétrica de partículas no eixo X na altura do finder sem refino de malha.

No primeiro refino da malha, foram colocadas três camadas de prismas hexaédricos, junto do *finder* e da parede do ciclone. Com a nova malha, procedeu-se a uma simulação com o diâmetro de corte, d_{pc} , do ciclone de diâmetro de 0,254m.

A malha numérica assim refinada possui 96798 elementos tetraédricos. A Figura 5.12 mostra a distribuição da fração volumétrica de partículas no plano XY na altura do *finder*. Foram realizadas simulações de 12s de fenômeno, que corresponde a 24h aproximadamente.

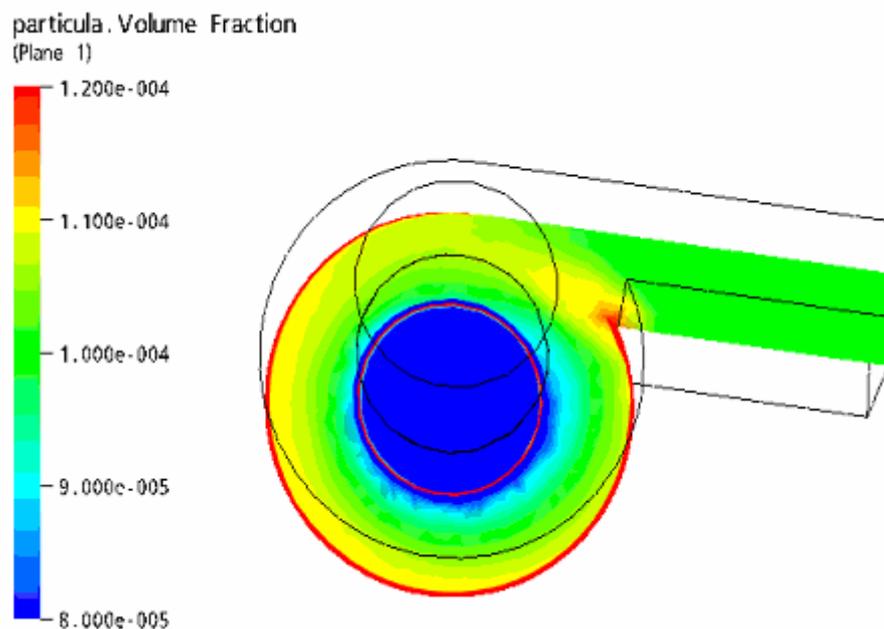


Figura 5.12: Distribuição da fração volumétrica de partículas para a malha com prismas na posição $z = 0,45\text{m}$.

Através da Figura 5.12 pode-se observar uma melhor definição dos gradientes na distribuição de fração volumétrica de partículas no ciclone. Na Figura 5.13 que apresenta um perfil de concentração de partículas no eixo X, pode-se observar os elevados gradientes de concentração junto às paredes do *finder* e do ciclone.

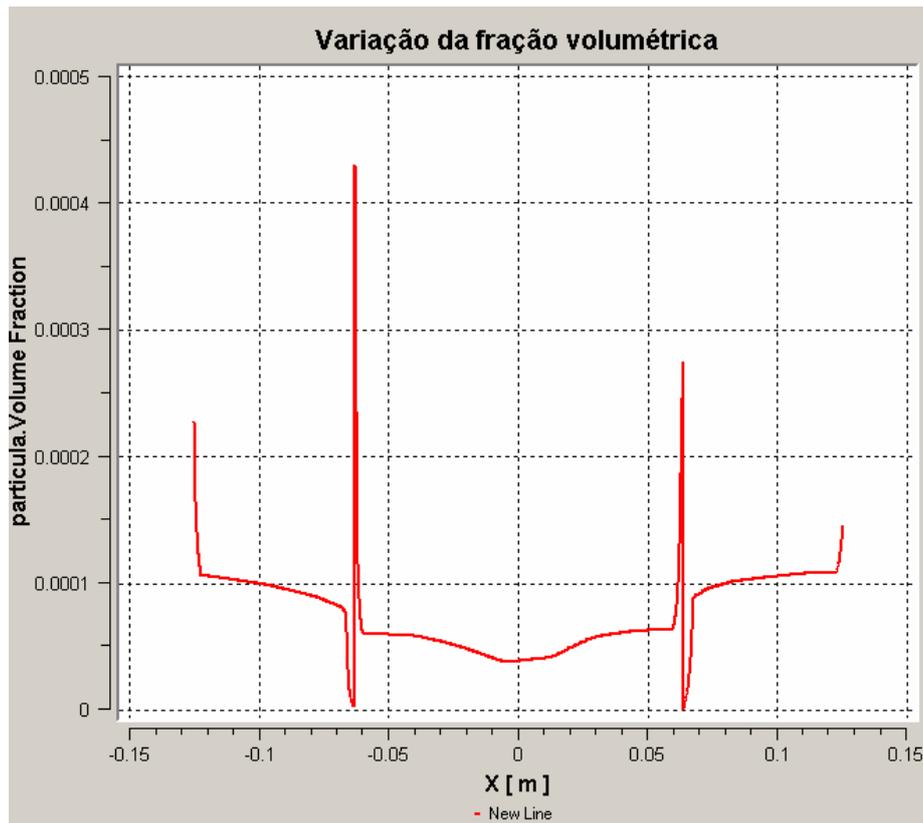


Figura 5.13: Perfil da fração volumétrica de partículas no eixo X na altura do finder com malha de três camadas de prismas junto às paredes

Nota-se que a colocação dos prismas junto à parede do *finder*, produziu fortes oscilações no perfil de concentração, possivelmente devido ao fato de as camadas prismáticas não cobrirem adequadamente a região da camada limite.

Visando minimizar as oscilações, procedeu-se um novo refinamento, desta vez com cinco camadas de prismas, obtendo-se 114074 elementos, a malha refinada é mostrada através da Figura 5.14. A Figura 5.15 mostra o novo perfil de concentração de partículas para as mesmas condições anteriormente consideradas.

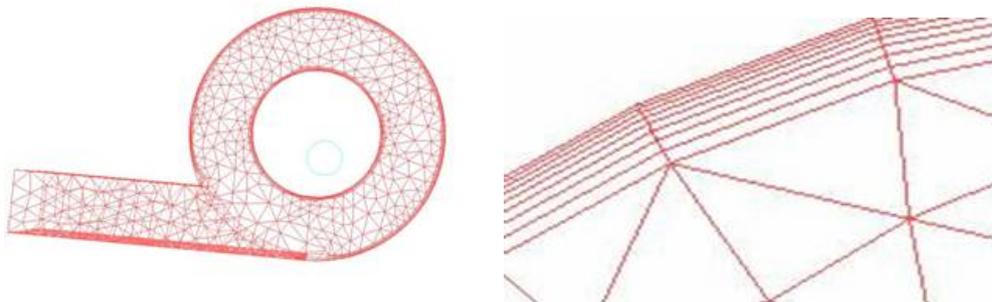


Figura 5.14: Malha refinada com cinco camadas prismáticas.

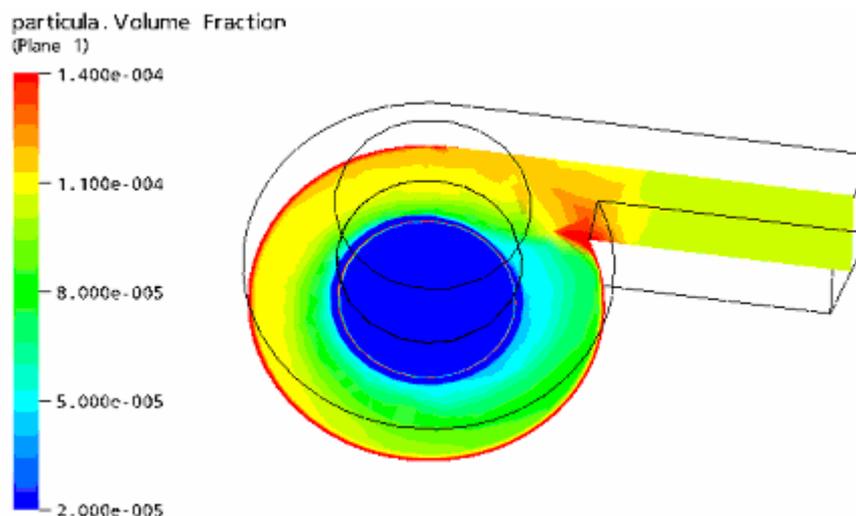


Figura 5.15: Distribuição da fração volumétrica de sólidos na posição $z = 0,45\text{m}$, para a malha com cinco camadas de elementos prismáticos junto às paredes.

Observando-se a Figura 5.15, para a malha com cinco camadas de prismas pode-se constatar uma melhor definição da distribuição de sólidos no ciclone, particularmente junto às paredes na região da camada limite.

A Figura 5.16 mostra um gráfico do perfil da fração volumétrica de sólidos no eixo X na altura do *finder*. Nota-se uma redução considerável dos efeitos de difusão numérica pela menor oscilação do perfil junto à parede do *finder*, onde se encontram elevadas concentrações de sólidos.

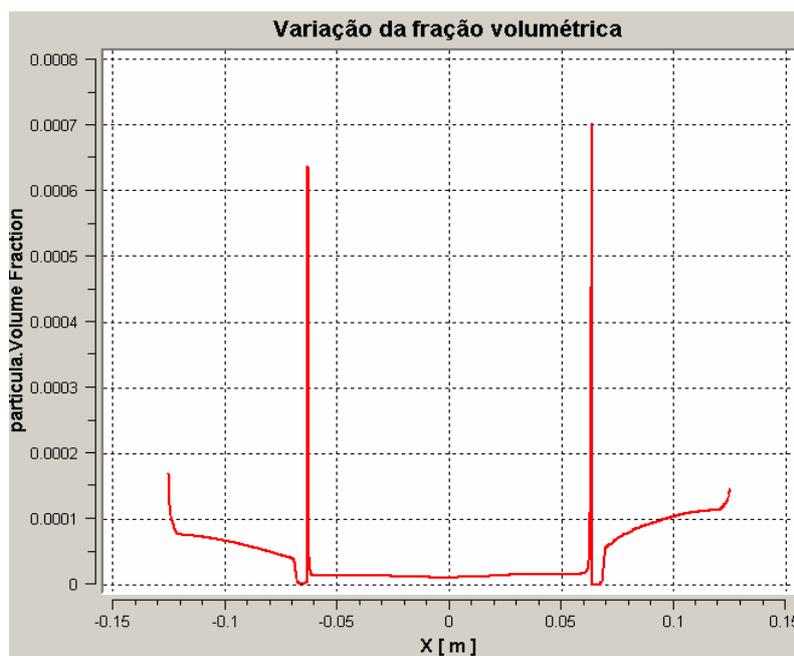


Figura 5.16: Perfil da fração volumétrica de sólidos no eixo X.

Para fins de comparação com outros estudos da literatura, a Figura 5.175 apresenta um gráfico do perfil de pressão na direção radial e posição $z = 0,35\text{m}$. Nota-se ao redor da coordenada axial do ciclone uma região de pressões negativas associadas à reversão do sentido, descendente do escoamento, para a saída superior da fase gasosa.

Pode ser observada uma diminuição na pressão no centro do ciclone ($x = 0$) estando em concordância com os resultados obtidos anteriormente da variação de pressão ao longo do ciclone.

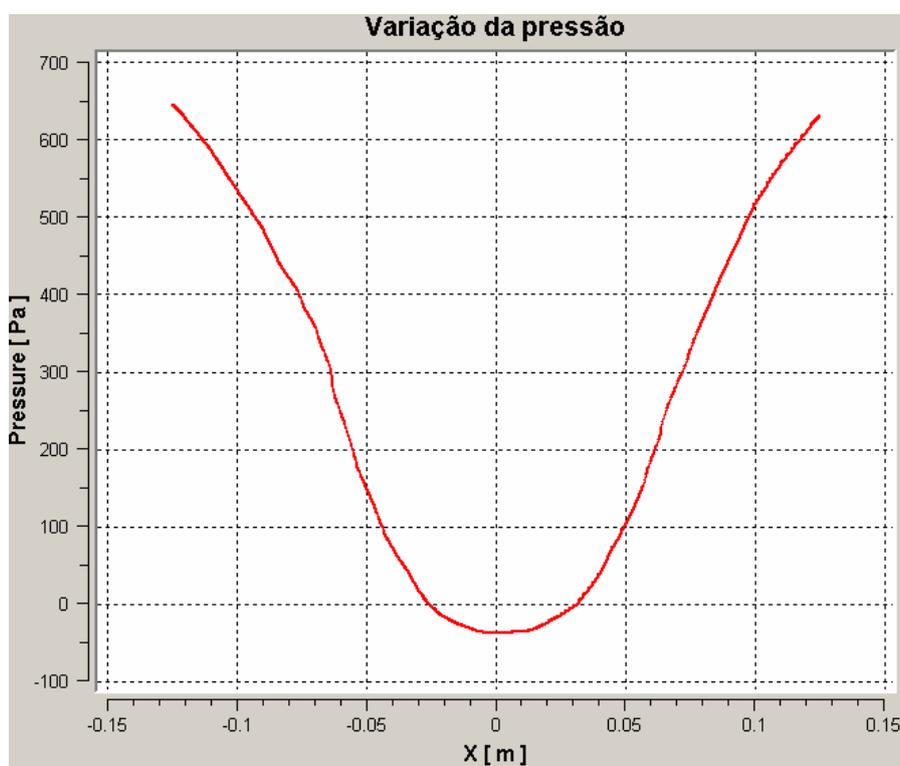


Figura 5.17: Perfil de pressão ao longo do eixo X na posição $z = 0,35\text{m}$.

O perfil obtido nesse caso é semelhante ao simulado por Bernardo (2005). Verifica-se que o refinamento da malha por meio de camadas de elementos prismáticos junto às paredes não altera a natureza do escoamento, mas sim reduz os efeitos dissipativos da difusão numérica na definição dos perfis de pressão e concentração. A zona de baixa pressão corresponde à reversão do escoamento.

A Figura 5.18 mostra a distribuição de velocidades do ar em diferentes posições da coordenada z e uma linha axial de variação da pressão.

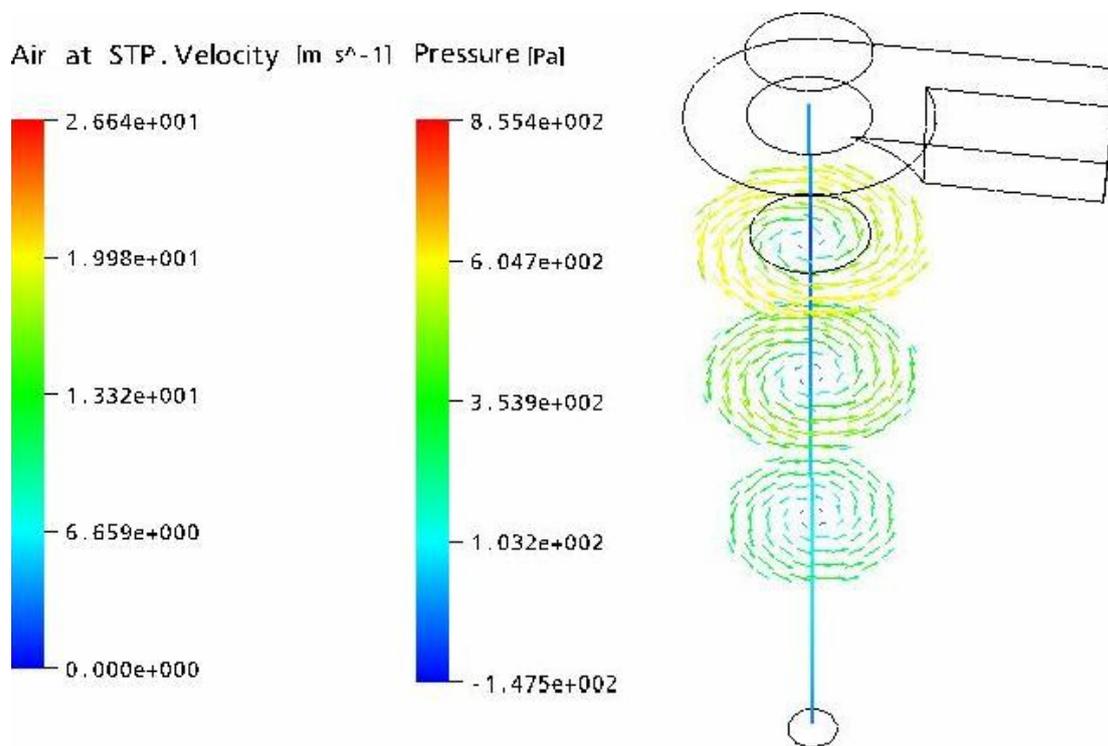


Figura 5.18: Pressão ao longo do ciclone e velocidade do gás.

Os vetores da Figura acima indicam o sentido e a intensidade da velocidade total do gás, enquanto que a linha axial a variação da pressão. Percebe-se que na posição das maiores velocidades, que corresponde ao campo circular mais claro, o segmento da linha axial é mais escuro (menores pressões) e, na altura das menores velocidades, que corresponde ao campo circular mais forte, o segmento axial é mais claro (maiores pressões). Tal comportamento é esperado e atende ao princípio da conservação da quantidade de movimento para o escoamento simulado.

O perfil da velocidade tangencial mostrado na Figura 5.19 é também qualitativamente semelhante ao obtido por Bernardo (2005), para um escoamento gás-sólido, utilizando o modelo de turbulência RSM.

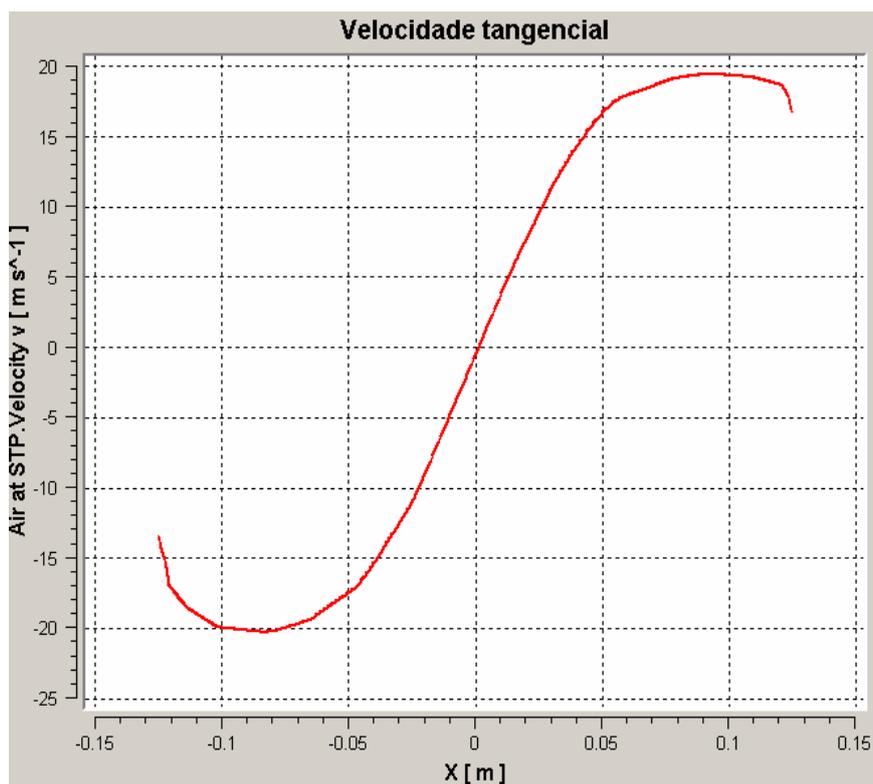


Figura 5.19: Perfil da velocidade tangencial ao longo do eixo X na posição $z = 0,30\text{m}$.

Assim o refino de malha proposto se mostrou eficiente na simulação do escoamento bifásico no ciclone apresentando, conforme a Tabela 5.4, valores de eficiência para o diâmetro de corte, dpc, em boa concordância com a previsão de Lapple (1951), para malha com cinco camadas de elementos prismáticos junto às paredes.

Tabela 5.4: Eficiências de coleta simuladas para o dpc comparadas com o valor de Lapple

	Sem prismas	1º refino	2º refino	Lapple
Eficiência (%)	85,6	39,2	53,2	50

Realizou-se uma simulação para o dpc com a malha refinada de cinco camadas de prismas para um tempo de 70 segundos de fenômeno, e tempo computacional de 10 dias. Observou-se que a queda de pressão alternava entre períodos de valores constantes e pequenas variações, talvez em decorrência de pequenas oscilações numéricas que repercutem sobre o acoplamento pressão-velocidade. Durante essa simulação, o fenômeno conhecido como “avalanche” de sólidos ocorreu no instante

$t = 25$ segundos, quando a eficiência de coleta oscilava ainda abaixo dos 40%. A Figura 5.20 mostra o comportamento da eficiência de coleta em relação ao tempo real de fenômeno simulado. Embora o fenômeno de “avalanche” por vezes ocorra nas operações reais com ciclones, não se pode afirmar categoricamente que esse resultado de simulação seja de natureza fenomenológica e não numérica resultante de algum tipo de instabilidade matemática. Para se decidir esta questão estudos mais aprofundada os faz necessários.

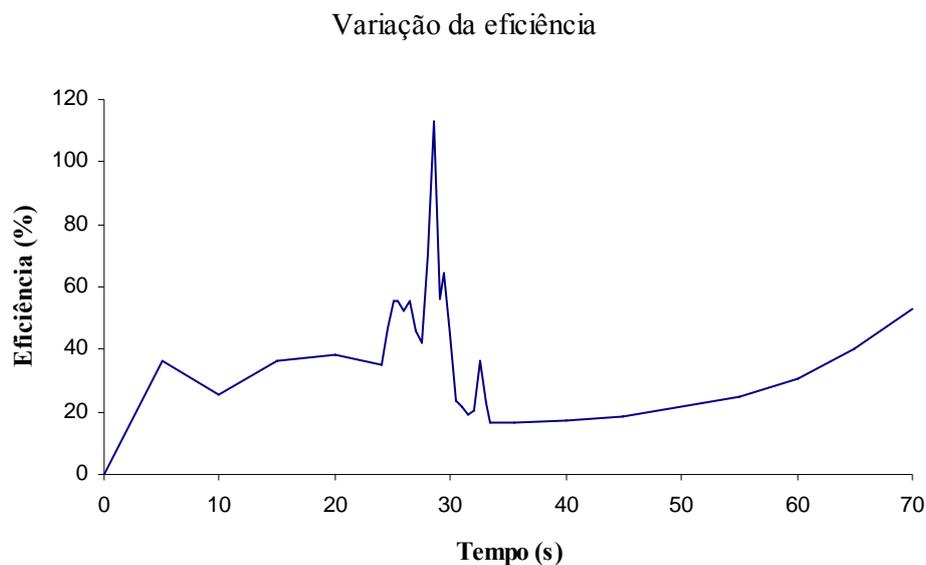


Figura 5.20: Variação da eficiência de coleta em tempo de simulação para o ciclone com diâmetro de 0,254m e malha cinco camadas prismáticas.

Visando reduzir os tempos computacionais de simulação, passou-se a trabalhar com um ciclone de diâmetro igual a 0,127m, mantendo-se a malha com cinco camadas prismáticas e realizando-se varias simulações para diferentes valores de diâmetro médio de partículas a fim de construir uma curva de eficiência tal como a de Lapple (1951), visando à validação do modelo proposto.

5.3 Eficiência de coleta e validação do modelo com um ciclone de 0,127m de diâmetro

Nesta seção estudou-se um ciclone com diâmetro de 0,127m considerado anteriormente, a fim de reduzir o tempo computacional requerido para as simulações.

A malha gerada possuía 57135 elementos tetraédricos, um número reduzido de elementos que assegurou uma convergência mais rápida dos cálculos.

O tempo real simulado para cada ensaio foi em média de 20s, sendo o tempo computacional de 24 a 36 horas, em alguns casos o fluxo de saída de sólidos se estabilizava antes desse período. Foram realizadas 12 simulações, considerando-se diferentes diâmetros médios de partículas para a construção de uma curva de eficiência de coleta que será apresentada mais adiante.

As condições de contorno, esquemas de interpolação e modelo de turbulência considerados foram os mesmos das simulações anteriores.

A Figura 5.21 mostra a distribuição da fração volumétrica de sólidos no ciclone em regime permanente, para o diâmetro de corte no caso, de 2,6 μm , calculado pela Equação 2.1.

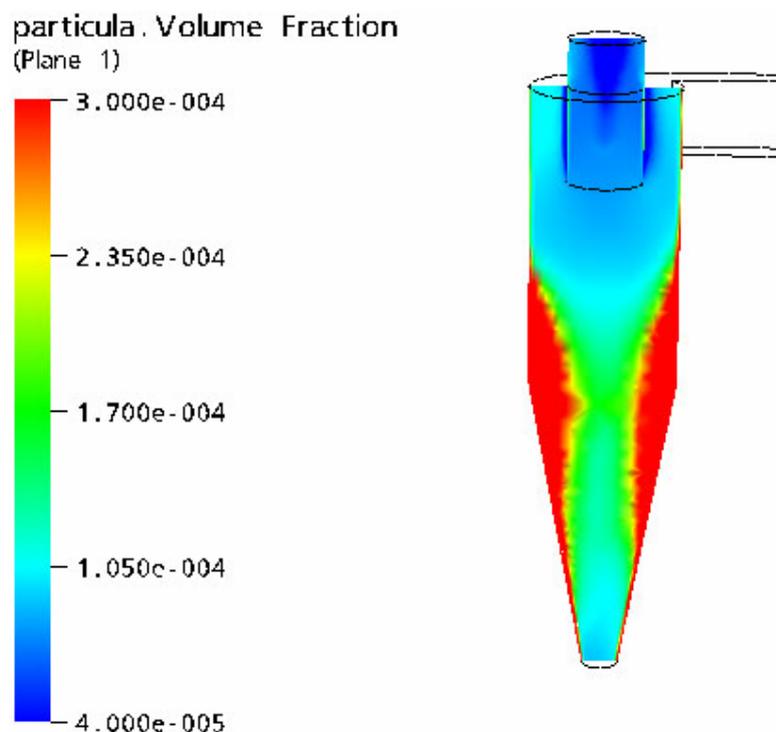


Figura 5.21: Distribuição da fração volumétrica de sólidos para partículas de diâmetro médio de 2,6 μm .

Como observado anteriormente as partículas se concentram próximas às paredes do ciclone. Neste caso, utilizou-se uma malha com cinco camadas de elementos prismáticos junto às paredes, o que assegurou um resultado de eficiência de coleta simulada próxima àquela indicada por Lapple (1951). Para os outros diâmetros de partículas testados, o comportamento da distribuição dos sólidos foi semelhante ao do diâmetro de corte.

A distribuição da queda de pressão pode ser visualizada pela Figura 5.22, sendo semelhante à obtida em simulações anteriores sem a adição de prismas à malha.

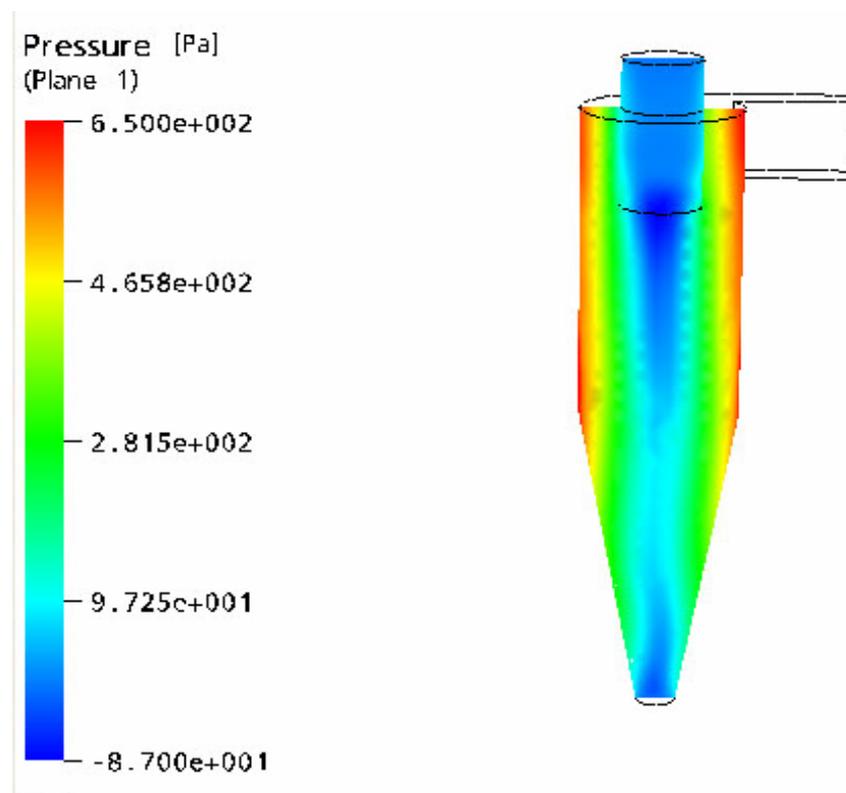


Figura 5.22: Distribuição da pressão para o ciclone de 0,127m de diâmetro.

Novamente, pode-se notar que a região de menor de pressão ao longo do eixo do ciclone, sendo a região interna do *finder* a de menor pressão.

A Figura 5.23 ilustra a distribuição da velocidade tangencial do gás, com perfis semelhantes aos obtidos anteriormente, caracterizando corretamente o comportamento do escoamento.

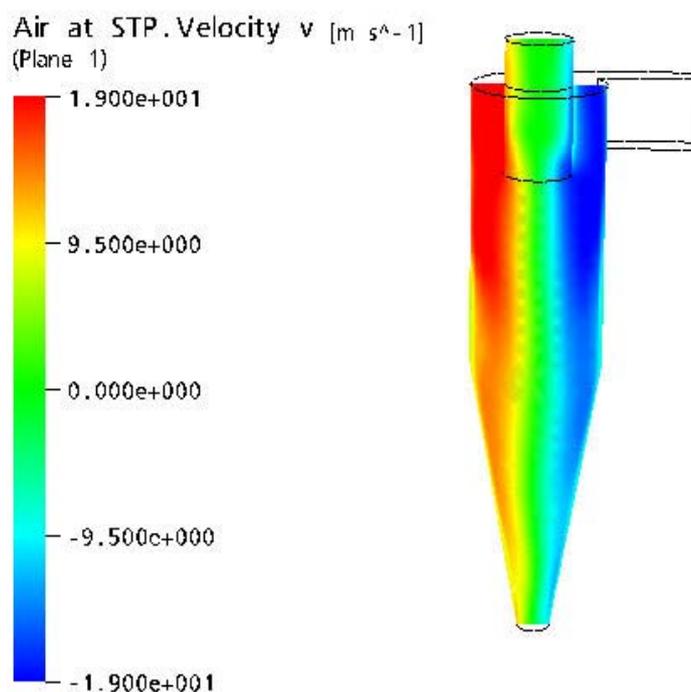


Figura 5.23: Distribuição da velocidade tangencial do gás para o ciclone de 0,127m de diâmetro.

A Figura 5.24 ilustra a distribuição da velocidade das partículas. Podem-se constatar maiores velocidades das partículas próximo ao *finder* e junto às paredes do ciclone, como também na parede interna da saída de gás, devido às pequenas partículas não coletadas. No geral, a velocidade aumenta em direção à parede do ciclone, mas os perfis observados são mais bem definidos do que nas simulações sem o refinamento com as camadas de elementos prismáticos.

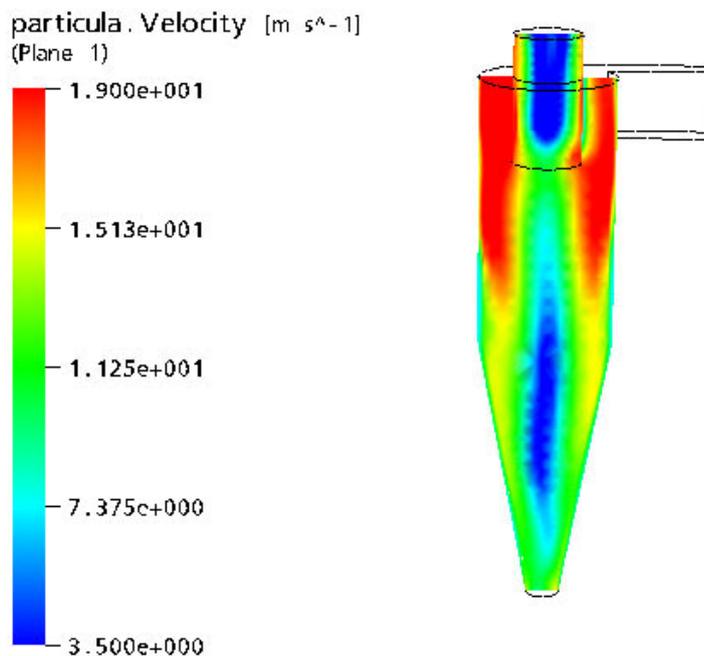


Figura 5.24: Distribuição da velocidade total das partículas para o ciclone de 0,127m de diâmetro.

Em todos os casos simulados se procedeu ao monitoramento da queda de pressão ao longo do tempo. O gráfico da evolução da queda de pressão global ao longo do tempo simulado para o diâmetro de partícula de 2,6 μ m é apresentado na Figura 5.25.

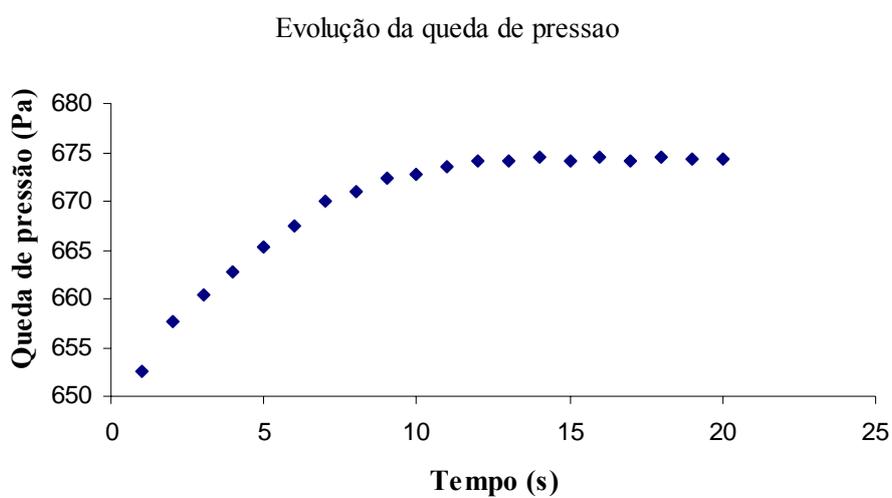


Figura 5.25: Evolução da queda de pressão global em função no tempo real simulado.

Para todas as simulações realizadas, verificou-se o mesmo comportamento da queda de pressão em função do tempo. Nos casos de diâmetros de partículas menores que $2,08\mu\text{m}$, a queda de pressão e o fluxo de sólidos na saída estabilizavam mais rapidamente, levando em média um tempo de 10 a 12s de fenômeno. Esse tempo é cerca de três vezes superior ao verificado nas simulações preliminares (item 5.1) atentando que o refinamento da malha também repercute sobre a previsão do tempo necessário para que se atinja o regime permanente.

Para a avaliação da queda de pressão, empregou-se a relação proposta por Shepherd e Lapple (1939). A Tabela 5.5 mostra os valores simulados e previsões pela relação empírica, assim como os desvios observados entre os mesmos.

Tabela 5.5: Queda de pressão para diferentes diâmetros de partículas.

dp (μm)	$\Delta P_{\text{simulada}}$ (Pa)	$\Delta P_{\text{empírico}}$ (Pa)
1,03	697,37	664,87
1,26	693,16	664,87
2,08	685,13	664,87
2,6	674,37	664,87
3,13	662,63	664,87
4,0	636,25	664,87
5,33	554,87	664,87
8,38	493,29	664,87
10,27	445,76	664,87
12,75	405,26	664,87
15,43	381,14	664,87
17,98	368,55	664,87

Os diâmetros de partículas foram escolhidos arbitrariamente de acordo com a relação para a eficiência de coleta de Lapple (1951), correspondente à curva apresentada na Figura 5.24.

Pela Tabela 5.5, nota-se que a queda de pressão global obtida pela relação empírica de Shepherd e Lapple (1939) é a mesma para todos os testes, pois essa teoria não considera a presença das partículas no escoamento. Por outro lado, os valores simulados de queda de pressão entre a entrada e a saída de sólidos variam de acordo

com o diâmetro da partícula a ser coletada. De acordo com Shepherd e Lapple (1939), o efeito da concentração de sólidos leva a uma redução na queda de pressão. Essa previsão foi confirmada pelo trabalho de Yuu et al (1978) que observaram que a presença de partículas na corrente gasosa reduz em até 30% a queda de pressão, mesmo para concentrações muito baixas de sólidos.

A fim de analisar a convergência e concordância das simulações com os resultados de Lapple (1951), construiu-se um gráfico conforme apresentado na Figura 5.26.

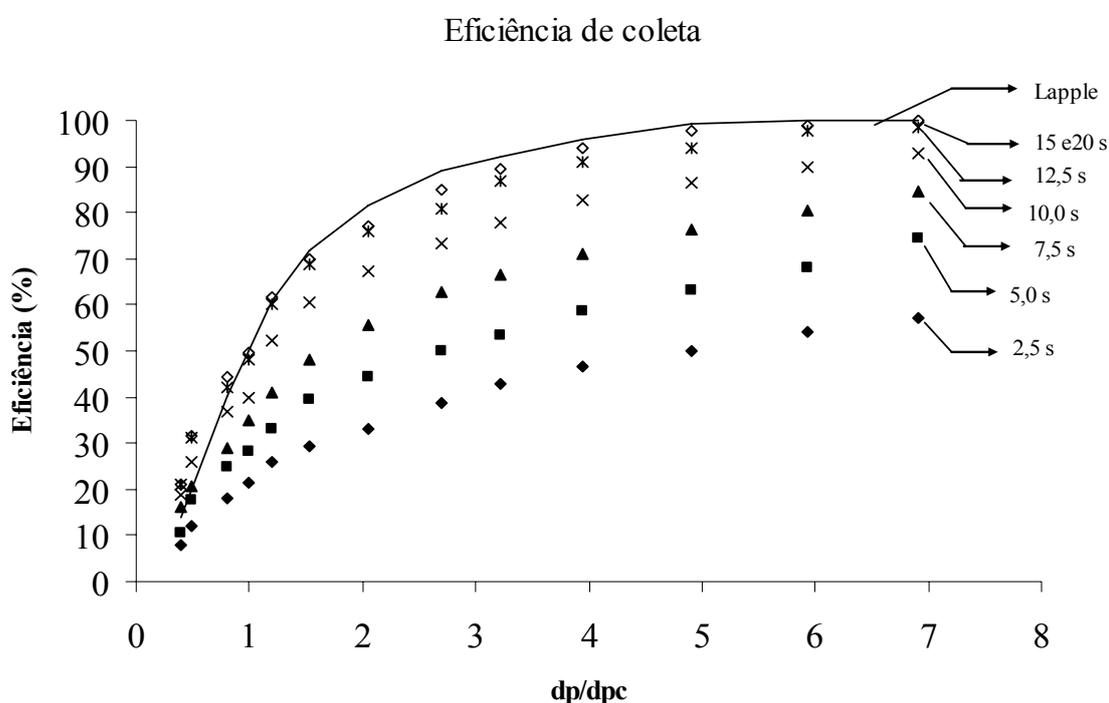


Figura 5.26: Eficiência de coleta para diferentes tempos simulados.

Através da Figura 5.234, pode-se verificar que a partir dos 15s simulados a curva de eficiência de coleta não mais varia, coincidindo com aquela proposta por Lapple (1951).

Em vista dos resultados obtidos, avalia-se que o modelo proposto está em condições de simular corretamente um ciclone real, podendo ser utilizado para estudos de projeto, desenvolvimento e otimização, bem como das condições de operação em processos específicos.

CAPÍTULO 06

CONCLUSÕES

Uma série de experimentos numéricos foi realizada através de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) visando à avaliação e validação de um modelo tridimensional para ciclones. Os casos simulados procuraram reproduzir a geometria e as condições operacionais dadas por Shepherd e Lapple (1939) e Lapple (1951).

Para as simulações foi utilizado um pacote comercial de CFD, considerou-se o modelo euleriano-euleriano multifásico bidimensional (EEMB) proposto por Meier (1998), modelo de turbulência RSM (*Reynolds Stress Model*) e esquemas de interpolação *upwind* para as variáveis descritivas.

A primeira parte do estudo envolveu simulações preliminares de um ciclone com características geométricas dadas por Lapple, sendo que o seu diâmetro foi escolhido num ciclone de uma planta de FCC (*fluid catalytic cracking*).

Em seguida, foi realizado um estudo de refinamento de malha numérica a fim reduzir os efeitos de difusão numérica e obter resultados de simulação mais acurados.

A terceira parte do estudo tratou da validação do modelo através da curva de coleta proposta por Lapple (1951), da coerência dos resultados com o fenômeno real e da observância dos critérios de convergência e estabilidade do esquema numérico.

As conclusões desses estudos podem ser resumidas como segue:

— Simulações Preliminares com ciclone de 0,254m de diâmetro

Nesse estudo pode-se constatar que as técnicas da fluidodinâmica computacional são confiáveis para obtenção de soluções acuradas do escoamento turbulento em ciclones.

Os perfis de velocidade tangencial, axial e de pressão, mostraram-se coerentes e em sintonia com os outros resultados encontrados na literatura.

A malha numérica utilizada inicialmente necessitou de refinamento a fim de melhorar os resultados de simulação, visto que as eficiências de coleta obtidas apresentaram grandes desvios em relação às indicadas por Lapple (1951). Portanto, fez-se necessária a introdução de camadas prismáticas junto às paredes do ciclone e do *finder*.

Os valores de queda de pressão também apresentaram desvios em relação ao valor calculado pela relação empírica de Shepherd e Lapple (1939) isso, porém se deve ao fato de que, na relação empírica, não é considerada a presença das partículas sólidas no escoamento.

— Estudo de refinamento e aperfeiçoamento da malha numérica

O refino da malha envolveu a colocação de camadas prismáticas junto às paredes do ciclone e do *finder*. Foram feitos dois refinamentos: no primeiro, foram colocadas três camadas de elementos prismáticos. Nesse caso, os resultados apresentaram fortes oscilações no perfil de concentração de sólidos junto às paredes do *finder*, isso provavelmente devido ao fato das camadas prismáticas não cobrirem toda a região da camada limite. Portanto, no segundo refino, buscou-se utilizar mais camadas de prismas de forma a cobrir integralmente a camada limite. Assim foram utilizadas cinco camadas de elementos prismáticos. Desta forma foram obtidos bons resultados para a predição do desempenho do ciclone, como também se descreveu adequadamente o comportamento do escoamento, com os elevados gradientes de concentração e velocidade junto às paredes.

Assim pôde-se concluir que a malha numérica com camadas prismáticas é mais eficiente para simular o escoamento no ciclone, bem como prever corretamente a eficiência de coleta.

— Eficiência de coleta e validação do modelo com um ciclone de 0,127m de diâmetro

Nos ensaios numéricos realizados com o ciclone de diâmetro de 0,127m, utilizou-se a malha refinada com cinco camadas de prismas. Verificou-se para todos

os ensaios que o regime permanente do escoamento era atingido após 15s de tempo simulado, o que corresponde a aproximadamente 30 horas de tempo computacional.

Através de 12 simulações, constatou-se que o modelo gera soluções que estão em concordância com os dados obtidos por Lapple (1951) para todos os diâmetros de partículas simulados. Porém, no que se refere à pressão ocorre desvios de até 37% devido à influência das partículas no escoamento, considerada no modelo numérico.

Os resultados apresentados referentes aos perfis de velocidade tangencial, axial e de pressão, foram coerentes com outros da literatura. Deste modo, pode-se afirmar que o modelo tridimensional proposto é válido para descrever o comportamento do escoamento de ciclones, assim como prever adequadamente seu desempenho.

Assim, novas perspectivas se abrem para o desenvolvimento de projetos de ciclones com geometrias diferenciadas destinadas a processos específicos, podendo-se também otimizar as condições operacionais.

CAPITULO 07**REFERÊNCIAS**

- AVCI, A., *Effects of Flow and Geometrical Parameters on the Collection Efficiency in Cyclone Separators*. Journal of Aerosol Science vol. 34, pg 937-955, 2003.
- AVEROUS, J. e FUENTES, R. *Advances in the Numerical Simulation of Hydrocyclones Classification*. Canadian Metallurgical Quartely, vol. 36, n° 05, pg 309-317, 1997.
- BARTH, W., *Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations*. Warme Kraft vol.8, pg1-9 1956.
- BASKAKOV, A. P., DOLGOV, V. N., GOLDOBIN, Y. M., *Aerodybamics and Heat Transfer in cyclone with Particle-laden Gas Flow*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 3, pg 597-602, 1990.
- BERNARDO, S., *Estudo dos Escoamentos Gasoso e Gás-Sólido em Ciclones pela Aplicação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD)*. Tese (Doutorado), FEQ/UNICAMP, Campinas, 266p, 2005.
- BLOOR, M. I. G., INGHAM, D. B., *The Flow in Industrial Hydrocyclones*. Journal Fluid Mechanics, vol. 178, pg. 507-519, 1987.
- BOYSANT, F., AYERS, W. H., SWITENBANK, J., *A Fundamental Mathematical Modelling Approach to Cyclone Design*. Institution of Chemical Engineers, vol. 60, pg. 222-230, 1982.
- CLIFT, R., M. GHADIRI, et al., *A Critique of Two Models for Cyclone Performance*. Aiche Journal vol. 37 n°2, 285-289, 1991

- CFD Online, *On-line Center for Computational Fluid Dynamics*, <http://www.cfd-online.com/>
- CORRÊA, J.L.G., *Discussão de Parâmetros de Projeto de secadores Ciclônicos*. Tese (Doutorado) UNICAMP, Campinas -SP, 2003.
- CORRÊA, J. L., GRAMINHO, D. R., SILVA, M. A., NEBRA, S. A., *The Cyclone Dryer-A Numerical and Experimental Analysis of the Influence of Geometry on Average Particle Residence Time*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 21, n° 01, pg. 103-112, 2004.
- CRISTEA, E. D., MALFA, E., *3D Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln Pre-Heater Top Cyclone*. Anais of Fluent European User's Group Meeting, Harrogate, U. K, 18pp, 9-10 Junho, 1994.
- CRISTEA, E. D., COGUE, A., *3D Numerical Computation and Validation of High Solid Loading Flow Inside a Gas Cyclone Separator*, Proceedings of FEDSM' 98: ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting Washington, DC, 7pp, 1998.
- DERKSEN, J. J., *Separation Performance Predictions of a Stairmand High-Efficiency Cyclone*. AIChE Journal, vol. 49 n° 06 pg. 1359-1371, 2003.
- DIETZ, P. W., *Collection Efficiency of Cyclone Separators*. AIChE vol. 27 n° 6, pg 888-892, 1981.
- DIRGO, J. AND D. LEITH., *Cyclone Collection Efficiency - Comparison of Experimental Results with Theoretical Predictions*. Aerosol Science and Technology vol. 4 n° 4, pg 401-415, 1985.
- DUGGINS, R.K., FRITH, P. C. W., *Turbulence Anisotropy in Cyclones*. Filtration and Separation, pg. 394-397, Nov-Dec, 1987.

- DYAKOWSKY, T., WILLIAMS, R. A., *Modelling Turbulent Flow Within a Small-Diameter Hydrocyclone*. Chemical Engineering Science, vol. 48 n° 06, pg. 1143-1152, 1993.
- FASSANI, F. L., L. GOLDSTEIN., *A Study of the Effect of High Inlet Solids Loading on a Cyclone Separator Pressure Drop and Collection Efficiency*. Powder Technology vol. 107, pg 60-65, 2000.
- FONTES, C.E., SILVA, L.F.L.R., LAGE, P.L.C., RODRIGUES, R.C., *Introdução a Fluidodinâmica Computacional*. Escola Piloto Virtual, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- GIMBUN, J., CHUAH, T. G., CHOONG, T. S. Y., FAKHRU'L-RAZI, A., *Prediction of the Effects of Cone Tip Diameter on the Cyclone Performance*. Journal of Aerosol Science, vol.36, n°8, pg 1056-1065, 2005.
- 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, vol. 54, pg. 2055-2065, 1999.
- HOFFMANN, A. C., A. VANSANTEN, et al., *Effects of Geometry and Solid Loading on the Performance of Gas Cyclones*. Powder Technology vol. 70 n° 1, pg 83-91, 1992.
- HOFFMANN, A. C., JONGE, R., ARENDS, H., HANRATS, C., *Evidence of the Natural Vortex Length and Its Effect on Separation Efficiency of Gas Cyclone*. Filtration and Separation, vol. 32, 799-804, 1995.
- HOFFMANN, A. C., GROOT, M., PENG, W., DRIES, H. W. A., KATER, J., *Advantages and Risks in Increasing Cyclone Separator Length*. AIChE Journal, vol. 47 n° 11, pg. 2452-2460, 2001.
- HOFFMANN, A. C., STEIN, L. E., *Gas Cyclone and Twirl Tubes: Principles, Design and Operation*. Springer pg 97-122, 2002.

- IOZIA, D. L. AND D. LEITH., *The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency*. Aerosol Science and Technology vol. 12 n° 3, pg 598-606, 1990.
- KIM, W. S. AND J. W. LEE., *Collection Efficiency Model Based on Boundary-Layer Characteristics for Cyclones*. AIChE Journal vol. 43 n° 10, pg 2446-2455, 1997.
- KIM, C. H., LEE, J. W., *A New Collection Efficiency Model for Small Cyclones Considering the Boundary-Layer Effect*. Journal of Aerosol Science, vol. 32, pg. 251-269, 2001.
- LAPPLE, C. E., *Process Use Many Collector Types*. Chemical Engineering vol. 58, pg 144-151, 1951.
- LAUDER, B.E., SPALDING, D.B. *The numerical Computation of Turbulent Flows*. Comp. meth. Applied Mech. Eng., vol 3, pg 269-289, 1974.
- LAUDER, B.E., REECE, G.J., RODI, W., *Progress in the Development of a Reynolds- Stress Turbulent Closure*. Journal of Fluid Mechanics, vol 68, pg 537-566, 1975.
- LEITH, D. LICHT, W., *The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors: A New Theoretical Approach*. AIChE Symp. Ser vol. 68, pg 196-206, 1972.
- MASSARANI,G., *Fluidodinâmica em Sistemas Particulares*, Ed. UFRJ Editora, Rio de Janeiro, 1997.
- MALISKA, C. R., *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*. Ed. LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro, 2004.
- MEIER, H. F., *Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional*. Tese (Doutorado), FEQ/UNICAMP, Campinas, 210p, 1998.

- MEIER, H. F., MORI, M., *Gas-solid Flow in Cyclones: The Eulerian-eulerian Approach*. Computers Chemical Engineering, vol. 22, pg. S641-S644, 1998.
- MEIER, H. F., MORI, M., *Anisotropic Behavior of the Reynolds Stress in Gas and Gas-Solid Flows in cyclones*. Powder Technology, vol. 101, pg. 108-119, 1999.
- MONTAVON, C. A., GROTTJANS, H., HAMIL, I. S., PHILLIPS, H. W., JONES, I. P., *Mathematical Modelling and Experimental Validation of flow in a Cyclone*. BHR Conference on cyclone Technologies, May-June, 2000.
- MOTHES, H. AND F. LÖFFLER., *Motion and Deposition of Particles in a Cyclone*. Chemie Ingenieur Technik vol. 56 n° 9, pg 714-715, 1984.
- MOTHES, H. L., F., *Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators*. Int. Chem. Eng vol. 28 n° 2, pg 231-240, 1988.
- MUSCHELKNAUTZ, E., *Design of cyclone Separators in the Engineering Practice*. Staub-Reinhalt, Luft, vol. 30, 1970.
- NARASHIMA, M., SRIPRIYA, R., BANERJEE, P. K., CFD Modelling of Hydrocyclone-Prediction of cut Size. *International Journal of Mineral Processing*, vol 75, n°1-2 , pg 53-68, 2005.
- NORILER, D., VEGINI, A. A., SOARES, C., BARROS, A. A. C., MEIER, H. F., MORI, M., *A New Role for Reduction in Pressure Drop in Cyclones Using Computational Fluid Dynamics Techniques*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 21 n° 01, pg. 93-101, 2004.
- OGAWA, A., *Mechanical Separation Process and flow patterns of Cyclone Dust Collectors*. Ind. Applied Mech. Ver, vol 50, n° 03, pg. 97-130, 1997.
- PATANKAR, S. V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Ed. Hemisphere Pub. Co., New York, 1980.

- PATANKAR, S. V., SPALDING, D. B., *A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in 3D Parabolic Flows*, Int. J. Heat and Mass Transfer, vol. 15, pg. 1797-1806, 1972.
- PERES, A. P., MEIER, H. F., HUZIWARA, W. K., MORI, M., *Experimental Study and Advances in 3D Simulation of Gas Flow in Cyclone Using CFD*. European Symposium on Computer Aided Process Engineering, n° 12, pg. 943-948, 2002.
- PERICLEOUS, K. A., *Mathematical Simulation of Hydrocyclones*. Applied Mathematical Modelling, vol. 11, pg. 242-255, August, 1987.
- RAITHBY, G.D., *Skew Upstream Differencing Schemes for Problems Involving Fluid Flow*. Comp. Meth. Applied Mech. Eng. vol. 9, pg 153-164, 1976.
- RODI, W., *Examples of Turbulence Models for Incompressible Flows*. AIAA Journal, vol 20, pg 872-879, 1976.
- ROTTA, J.C. *Statistical Theory of Inhomogeneous Turbulence*. Z. Physical, vol 129, pg 547-559, 1951.
- SAFFMAN, P.G., *Model Equations for Turbulent Shear Flow*. Study Applied Mathematical, vol 53, pg 17-34, 1974.
- SHEPHERD, C. B., LAPPLE, C. E., *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors*. Ind. Engineering Chemistry, vol 31, n° 08, pg. 972-983, 1939.
- SILVA, M. A., NEBRA, S. A., *Simulação da Transferência de Calor no Ciclone*, XXII ENEMP - Vigésimo Segundo Encontro sobre Meios Porosos, Florianópolis, SC, Brasil, pg. 251-528, 1994.
- SLATERRY, J.C., *Momentum, Energy, and Mass Transfer in Continua*. Ed. cGraw-Hill Book Co., New York, 1972.

- SPEZIALE, C.G., *Analytical Methods for the Development of Reynolds Stress Closures in Turbulence*. *Annu. Review of Fluid Mechanics*, vol 23, pg 107-157, 1991.
- STAIRMAND, C.J., *The Design and Performance of a cyclone Separators*. TRans. Ins. Che. Eng., vol 29, pg 356-373, 1951.
- XIANG, R. B., LEE, K. W., *Numerical Study of Flow Field in Cyclones of Different Height*. Chemical Engineering and Processing, vol. 44, pg. 877-883, 2005.
- ZHAO, Z. M. AND R. PFEFFER., *A Simplified Model to Predict the Total Efficiency of Gravity Settlers and Cyclones*. Powder Technology vol. 90 n° 3 pg 273-280, 1997.
- ZHAO, B., *Development of a New Method for Evaluating Cyclone Efficiency*. Chemical Engineering and Process, vol. 44, pg. 447-451, 2005.
- ZHOU, L. X., SOO, S. L., *Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator*. Powder Technology, vol. 63, pg. 45-53, 1990.
- ZHOU, L.X., *Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion*. Ed. Science Press, Beijing, 1993.