



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

FRANCIANE FÁTIMA PORTES CERRI

**ESTUDO PARA VALIDAÇÃO DE MODELO GÁS-SÓLIDO EM
SEPARAÇÃO CICLÔNICA DE SAIS DE IODO NA INDÚSTRIA
QUÍMICA**

Florianópolis, Maio de 2010.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA E
ENGENHARIA DE ALIMENTOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**ESTUDO PARA VALIDAÇÃO DE MODELO GÁS-SÓLIDO EM
SEPARAÇÃO CICLÔNICA DE SAIS DE IODO NA INDÚSTRIA
QUÍMICA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química.**

FRANCIANE FÁTIMA PORTES CERRI

Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Henry França Meier

Coorientadora: Prof^{da}. Dr^a. Selene M. A. Guelli Ulson de Souza

Florianópolis, Maio de 2010.

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

C417e Cerri, Franciane Fátima Portes
Estudo para validação de modelo gás-sólido em separação
ciclônica de sais de iodo na indústria química
[dissertação] / Franciane Fátima Portes Cerri ; orientador,
Antonio Augusto Ulson de Souza. - Florianópolis, SC, 2010.
74 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química.

Inclui referências

1. Engenharia química. 2. Ciclones. 3. Escoamento
bifásico. 4. Verificação. 5. Validação. I. Souza, Antônio
Augusto Ulson de. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.
III. Título.

CDU 66.0

ESTUDO PARA VALIDAÇÃO DE MODELO GÁS-SÓLIDO EM SEPARAÇÃO CICLÔNICA DE SAIS DE IODO NA INDÚSTRIA QUÍMICA

FRANCIANE FÁTIMA PORTES CERRI

Dissertação de mestrado submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Prof. Dr. Leonel Teixeira Pinto
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Augusto Ulson de Souza
Orientador e Presidente da Banca

Prof. Dr. Henry França Meier
Coorientador

Profa. Selene M. A. G. Ulson de Souza
Coorientadora

Dra. Prof. Dr. José Antônio de Souza

Prof. Dr. Dirceu Noriler

Prof. Dr. Ayres Ferreira Morgado

Florianópolis, Maio de 2010.

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais, que sempre estiveram ao meu lado, me incentivando em busca de meus objetivos durante todo este período.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Antônio Augusto e Selene, da UFSC, pela orientação e confiança.

Ao professor Henry, da FURB, pela oportunidade, orientação e confiança.

Ao Sr. Adilson e Henri, da empresa INCASA S/A, pelo apoio.

Aos meus amigos Salvelino, Niége e Mara, pela amizade e apoio.

Aos meus pais, Alcides Cerri e Neusa Carmem Portes Cerri, pelo amor, apoio, dedicação e por estarem sempre presentes em todos os momentos.

À toda minha família que sempre esteve torcendo por mim.

RESUMO

Os ciclones, utilizados como equipamentos para troca térmica, como secadores, reatores para reações rápidas e para separação gás-sólido, apresentam na sua forma clássica uma construção cônica-cilíndrica, e têm como principais vantagens o baixo custo de construção, operação e manutenção. No passado o estudo de ciclones era basicamente experimental, resultando em correlações empíricas sem muita generalidade e dedicadas exclusivamente para a faixa de condições geométricas e operacionais analisadas nos experimentos. Com o desenvolvimento da tecnologia computacional, a modelagem numérica ganhou papel fundamental no estudo de escoamentos turbulentos multifásicos, típicos do escoamento ciclônico, destacando-se neste sentido as técnicas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), como uma ferramenta de pesquisa e desenvolvimento de projetos de engenharia. Neste trabalho é desenvolvido um estudo de modelagem numérica de ciclones a partir dos recursos de CFD, juntamente com um estudo experimental em uma Unidade Experimental de Dutos e Ciclones (UE-DC) do Laboratório de Verificação e Validação da FURB. O objetivo principal é validar um modelo gás-sólido bifásico utilizado para separação ciclônica de iodato de cálcio, produzidos numa planta química de extração de iodo. Esta comprovação de modelo é realizada por comparação entre dados experimentais obtidos na UE-DC de perda de carga, eficiência global de coleta e curva de eficiência, com resultados numéricos do modelo bifásico gás-sólido, implementado no código numérico CYCLO-HEXA, dedicado exclusivamente à simulação de ciclones por técnicas de CFD. Experimentos planejados e executados no aparato experimental para diferentes velocidades de entrada e razões de carga constituem uma base empírica necessária e suficiente para estudos de validação do modelo, e de verificação do código de CFD, que permitem estudos avançados de melhoria de equipamento (reengenharia geométrica) e das condições operacionais na planta química.

Palavras-chave: *Ciclones, CFD, Escoamento Bifásico, Verificação e Validação.*

ABSTRACT

The cyclones used as heat exchange equipment such as dryers, reactors for fast reactions and gas-solid separation, presented in its classic form a cone-cylindrical construction, and have as main advantages the low cost of construction, operation and maintenance. In the past the study of cyclones was basically experimental, resulting in empirical correlations without much general and dedicated exclusively to the range of geometrical and operating conditions analyzed in the experiments. With the development of computer technology, numerical modeling plays a fundamental role in the study of turbulent multiphase, typical of cyclonic flow, especially in the technical sense of CFD (Computational Fluid Dynamics), as a tool for research and development projects engineering. In this work we developed a numerical modeling study of cyclones from the resources of CFD, together with an experimental study in an Experimental Unit Pipeline and Cyclones (EU-DC). The main objective is to validate a model gas-solid two-phase used to separate low-level calcium iodate, produced in a chemical plant for extraction of iodine. The corroboration of the model is performed by comparing experimental data obtained in the EU-DC loss, efficiency and overall collection efficiency curve, with numerical results of the model gas-solid two-phase, implemented in numerical code CYCLO-HEXA, devoted exclusively the simulation of cyclones using CFD techniques. Experiments planned and implemented in the experimental apparatus for different input velocities and load relations are an evidence base necessary and sufficient for studies of model validation and verification of the CFD code, which allow advanced studies for improvement of equipment (geometrical reengineering) and operating conditions in the chemical plant.

Keywords: Cyclones, CFD, Two-phase flow, Verification and Validation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Objetivos	25
1.1.1 Objetivo geral	25
1.1.2 Objetivos específicos	25
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Separadores centrífugos	27
2.2 Descrição e princípio de funcionamento de ciclones	27
2.3 Tipos de ciclones.....	30
2.3.1 Diâmetro de corte e eficiência global de separação.....	31
2.3.2 Queda de pressão no ciclone.....	33
2.4 Caracterização das partículas	34
2.4.1 Granulometria das partículas	34
2.4.2 Modelos de ajustes de distribuição granulométrica	35
2.5 Visão geral das técnicas numéricas de CFD (Computational Fluid Dynamics)	36
2.6 Estado da arte na simulação de ciclones pela técnica CFD.....	38
CAPÍTULO 3 - MODELAGEM MATEMÁTICA	49
3.1 Modelo euleriano-euleriano bifásico (EEB)	49
3.2 Equações de conservação.....	50
3.3 Equações constitutivas	51
3.3.1 Modelo de turbulência.....	51
3.3.2 Interação entre as fases (gás-sólido)	54
3.4 Condições iniciais e de contorno	55
CAPÍTULO 4 - O CÓDIGO DE CFD CYCLO-HEXA.....	59
4.1 Código CYCLO-HEXA.....	59

CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS	63
5.1 Material particulado.....	63
5.2 Unidade experimental física	65
5.2.1 O sistema gerador de pó.....	66
5.2.2 Aquisição dos dados experimentais.....	67
5.3 Planejamento experimental físico.....	69
5.4 Planejamento experimental numérico.....	70
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	71
6.1 Validação do modelo	71
6.1.1 Predição da perda de carga no ciclone	71
6.1.2 Predição da eficiência global de separação	74
6.2 Visualização científica das predições numéricas	77
6.2.1 Análise dos mapas da fração volumétrica para diferentes diâmetros de partículas.....	77
6.2.2 Predição das características fenomenológicas do escoamento ciclônico	80
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	85
7.1 Conclusões.....	85
7.2 Sugestões para próximos trabalhos.....	85
REFERÊNCIAS.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ciclone Convencional e suas dimensões	28
Figura 2.2 – Ciclone e suas características fenomenológicas.....	29
Figura 3.1 – Desenho esquemático de um ciclone	57
Figura 4.1 – Planilha malha _ pdr	60
Figura 4.2 – Montagem da malha numérica.....	61
Figura 4.3 – Tela de acompanhamento do código CYCLO-HEXA.....	62
Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica cumulativa	64
Figura 5.2 – Unidade experimental de dutos e ciclone – UE-DC.	65
Figura 5.3 – Gerador de pó.....	66
Figura 5.4 – Tela acompanhamento aquisição dados experimentais.....	67
Figura 6 (a) – Comparação da perda de carga experimental com o resultado numérico com razão de carga média.....	72
Figura 6 (b) – Comparação da perda de carga experimental com resultado numérico com razão de carga máxima.....	73
Figura 6.1 – Eficiência global de separação numérica para diferentes diâmetros de partícula	75
Figura 6.2 – Eficiência global de separação no ciclone em função da velocidade de entrada.....	76
Figura 6.3 (a) – Mapa da fração volumétrica da fase sólida.....	78
Figura 6.3 (b) – Mapa da fração volumétrica da fase sólida.....	79
Figura 6.4 – Mapa de velocidade axial.....	80
Figura 6.5 – Mapa de pressão.....	81
Figura 6.6 – Mapa de velocidade tangencial do gás.....	82
Figura 6.7 – Mapa velocidade tangencial gás-sólido	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais relações geométricas dos ciclones Lapple e Stairmand	30
Tabela 3.1 – Constantes do modelo k- ϵ	54
Tabela 3.2 – Condições de contorno aplicadas ao modelo EE ₁	56
Tabela 5.1 – Resultado análise granulométrica.....	64
Tabela 5.2 – Planejamento experimental físico.....	69
Tabela 6.1 – Comparação perda de carga experimental e numérica Figura 6 (a).....	72
Tabela 6.2 – Comparação perda de carga experimental e numérica Figura 6 (b).....	73
Tabela 6.3 – Comparação perda de carga experimental e numérica Figura 6 (a) e 6 (b).....	74
Tabela 6.4 – Eficiência global de separação numérica para diferentes diâmetros	75
Tabela 6.5 – Comparação eficiência global de separação experimental e numérica	77

NOMENCLATURA

- b – Largura da entrada do ciclone [m]
 C_D – Coeficiente de arraste [$\text{kg}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$]
 C_μ , C_1 e C_2 – Constantes do modelo [adimensional]
D – Diâmetro da partícula [m]
 D_c – Diâmetro do ciclone [m]
Dg – Taxa de deformação [Pa]
 D_h – Diâmetro hidráulico da seção de entrada do ciclone [m]
DI – Diâmetro da saída de sólidos [m]
 D_{pc} – Diâmetro de corte [m]
 d_p – Diâmetro das partículas [m]
 D_s – Diâmetro do tubo de saída do gás [m]
 $(F_{res})_{g-s}$ – Força resistiva gás-sólido [N]
 f_g – Fração volumétrica da fase gás [adimensional]
 f_s – Fração volumétrica da fase sólida [adimensional]
 G_g – Geração de energia cinética turbulenta [m^2/s^2]
g – Campo gravitacional [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
 k_g – Energia cinética turbulenta [m^2/s^2]
 K_1 e K_2 – Constantes do modelo de interação [adimensional]
 L_c – Altura da parte cilíndrica do ciclone [m]
 L_{co} – Altura da cônica do ciclone [m]
 L_e – Altura da entrada do ciclone [m]
 L_s – Altura do finder [m]
 m_s - Massa de sólido na saída inferior do ciclone (*underflow*) [g]
 m_e - Massa de sólido na entrada do ciclone [g]
 N_e – Número de voltas do gás no interior do ciclone
p – Pressão [Pa]
 ΔP – Queda de pressão no ciclone [Pa]
 Re_p – Reynolds da partícula (adimensional)
T^{ef} – Tensão cisalhamento (efetivo) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$]
 v_e - Velocidade de entrada do gás no ciclone [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_g – Vetor velocidade da fase gás [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
v_s – Vetor velocidade da fase sólida [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
|v_g – v_s| - módulo da velocidade relativa entre as fases (gás-sólido) [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

LETRAS GREGAS

β_{g-s} – Coeficiente de interface entre as fases (gás-sólido) [adimensional]

ϕ_p – Esfericidade da partícula [adimensional]

σ^k e σ^ε – Constantes do modelo k- ε [adimensional]

μ – Viscosidade do gás [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]

μ^{ef} – Viscosidade efetiva [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]

μ_g – Viscosidade molecular [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]

$\mu_g^{(t)}$ – Viscosidade turbulenta [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$]

ρ_s – Massa específica do sólido [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

ρ_g – Massa específica do gás [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

η – Eficiência do ciclone [%]

ε_g – Taxa de dissipação da energia térmica turbulenta da fase gasosa [m^2/s^3]

ξ – Constante para o cálculo da pressão [adimensional]

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Muitos são os processos industriais que envolvem o processamento de materiais sólidos, onde a separação das partículas sólidas suspensas em uma corrente fluida está relacionada com a necessidade de recuperação do material arrastado ou em função da quantidade emitida para a atmosfera estar acima dos valores permitidos por lei.

Os ciclones são certamente um dos mais utilizados, antigos e conhecidos dispositivos destinados à recuperação dos materiais particulados nos processos e na separação de partículas sólidas presentes em uma corrente gasosa. Neste tipo de equipamento, a separação do sólido presente na corrente gasosa, ocorre pela ação do campo centrífugo resultante da geometria do equipamento e pelo modo pelo qual a suspensão escoar no interior do ciclone.

Este tipo de equipamento pode ser empregado em indústrias químicas, metalúrgicas, alimentícias e na área ambiental, principalmente nos dias de hoje, devido à maior preocupação e rigor da legislação com os temas relacionados a esta área.

Atualmente, simulações numéricas têm sido utilizadas para obter informações detalhadas da fluidodinâmica em ciclones. A modelagem em ciclones tem sido aprimorada, no decorrer dos anos. Avanços significativos têm sido alcançados na modelagem do movimento de partículas sólidas em ciclones e tem contribuído para o crescimento do uso da simulação numérica como ferramenta de otimização de processos e de projeto de unidades, mediante a validação dessas simulações com dados experimentais.

A técnica de fluidodinâmica computacional ,CFD (*computational fluid dynamics*), tem sido uma das técnicas de simulação numérica mais utilizada na solução de problemas da área de mecânica dos fluidos. Para escoamentos bifásicos gás- sólido em ciclones, que é o caso que será estudado neste trabalho, adota-se um modelo multifásico, que trata as duas fases como contínuas e interpenetrantes. Assim, a técnica de CFD aplicada em ciclones, consiste na formulação do problema através das equações diferenciais parciais provenientes dos balanços de massa e momento para ambas as fases, bem como suas respectivas equações constitutivas e da resolução do sistema de equações por meio da aplicação de métodos numéricos.

A técnica de CFD permite a solução de equações não lineares que descrevem o escoamento dos fluidos e tem sido utilizada para modelar ciclones com diferentes níveis de complexidade, tornando-se uma importante ferramenta de pesquisa e desenvolvimento de projetos de engenharia.

Com o desenvolvimento da área da fluidodinâmica computacional (CFD), vários códigos computacionais comerciais, como por exemplo, CFX, FLUENT, PHOENICS, FLOW3D, foram desenvolvidos e são utilizados no projeto e otimização de vários equipamentos, inclusive para o projeto e a otimização de ciclones, substituindo desta maneira, a utilização dos métodos empíricos convencionais (VEGINI, 2007).

Meier (1998) desenvolveu um código computacional específico para ciclones, utilizando-se das técnicas de CFD e com a possibilidade de usar um modelo baseado na abordagem euleriana-euleriana ou na abordagem euleriana-euleriana-lagrangeana (VEGINI, 2007).

A proposta deste trabalho é o desenvolvimento experimental para a determinação de parâmetros do escoamento gás-sólido em ciclones, visando à validação do código computacional desenvolvido por Meier (1998), aplicado a simulação de um sistema bifásico gás-sólido em ciclones com abordagem euleriana-euleriana.

Motivação pelo Tema

O iodato de cálcio, material particulado utilizado nos experimentos desta dissertação, é um insumo utilizado para ração animal e no processo de produção, nas etapas de moagem e embalagem, há grande dispersão do material particulado no ambiente de trabalho. Visando o atendimento às normas ambientais, da saúde do colaborador e pelo alto valor agregado do produto, se faz necessário o estudo para otimização de um ciclone para a retenção do particulado.

1.1 Objetivos

Neste capítulo consta o escopo do tema estudado e as diversas análises que serão empregadas para avaliar o êxito deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em verificar e validar o código computacional CYCLO-HEXA desenvolvido por Meier (1998), utilizando técnicas de CFD que aplica uma abordagem euleriana-euleriana bifásico para separação ciclônica de sais de iodo, através de medidas experimentais de desempenho macroscópico de ciclones como eficiência global de separação e perda de carga.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realização de experimentos variando as condições de velocidade de entrada do gás e razão de carga de sólidos no ciclone, com medidas de desempenho em termos de perda de carga e eficiência global de separação;
- Realização da simulação numérica para comparação dos resultados experimentais da eficiência global de separação e perda de carga de ciclones, mediante os ensaios numéricos;
- Validação do modelo computacional euleriano-euleriano em escoamento bifásico (EE_1) em ciclones.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada de uma forma sucinta a revisão bibliográfica sobre os principais parâmetros relacionados ao projeto de ciclones e a aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para a simulação de ciclones.

2.1 Separadores centrífugos

Neste tipo de separadores, as partículas são separadas da corrente fluida sob a ação de uma força centrífuga. Os equipamentos mais utilizados dessa classe de separadores são os ciclones e hidrociclones. A diferença entre o ciclone e hidrociclone é que o primeiro é utilizado para promover a separação de partículas em uma corrente gás-sólido e o segundo para a separação de partículas em uma corrente líquido-sólido. Neste trabalho será abordado o separador do tipo ciclone.

2.2 Descrição e princípio de funcionamento de ciclones

Ciclone é o nome genérico do coletor centrífugo onde as partículas são removidas do fluxo gasoso, pela ação da força centrífuga resultante do escoamento da suspensão. Esse equipamento, utilizado na separação de sólidos de maior tamanho de uma corrente gasosa, apresenta, na sua forma clássica, uma construção cônica-cilíndrica, conforme esquema dimensional apresentado na Figura 2.1. O ciclone tem sido considerado como um dos mais simples e econômicos separadores de material particulado, funcionando como pré-coletor, de modo a reduzir a carga de coleta no coletor principal.

Os ciclones oferecem como principais vantagens a facilidade de construção, os baixos custos de operação e a habilidade de poder operar a altas temperaturas e pressões (KOCH & LICHT, 1977).

O ciclone, esquematizado na Figura 2.2, conforme Ogawa (1997) apud Meier (1998) estabelece um movimento rotatório para o gás, de modo que a força centrífuga aplicada às partículas seja maior que as forças de coesão molecular e da gravidade, fazendo com que as mesmas sejam lançadas de encontro às paredes, retirando-as da massa gasosa em escoamento. A corrente gasosa entra tangencialmente a alta velocidade na câmara formando uma espiral descendente externa e uma espiral

ascendente interna. O gás é descarregado axialmente pela saída, localizada no topo do ciclone. A aceleração centrífuga impulsiona as partículas contidas no gás contra a parede. A componente vertical da força forçam as partículas para a parte inferior do ciclone, de onde elas vão para um local de armazenamento. A eficiência de coleta dos ciclones é afetada por fatores dimensionais, características do gás, e pelas propriedades do pó.

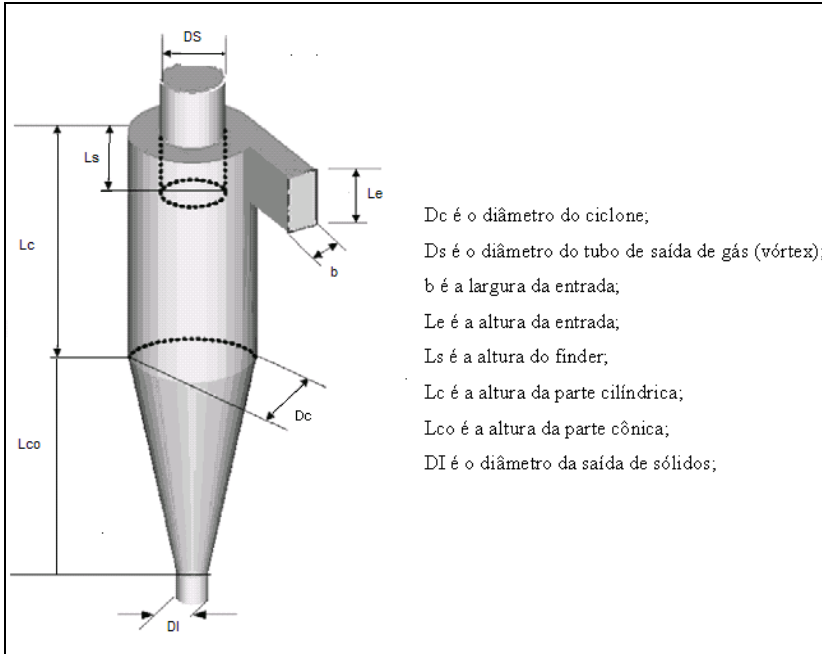


Figura 2.1 – Ciclone Convencional e suas dimensões

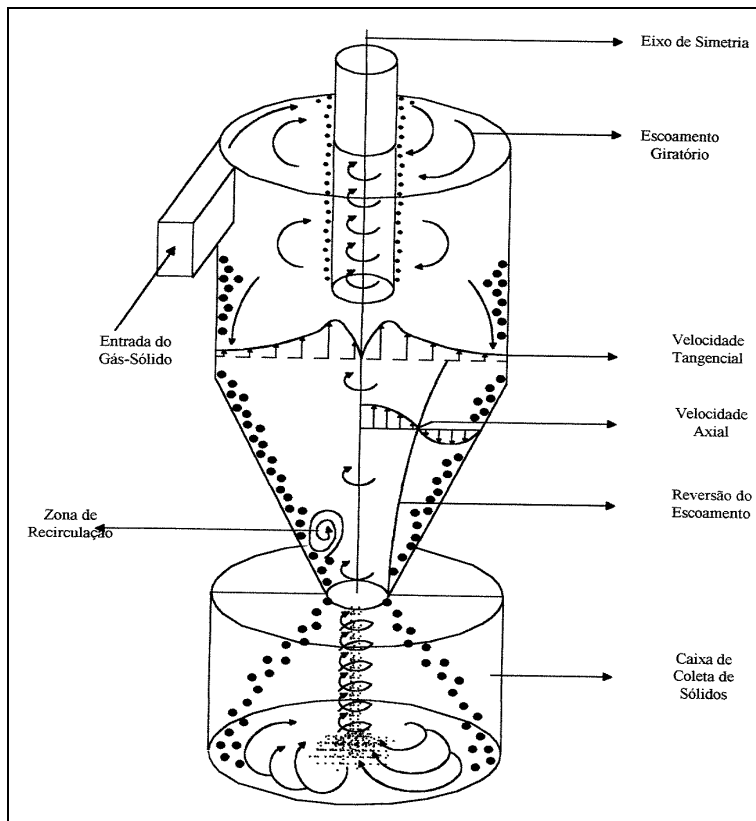


Figura 2.2 – Ciclone e suas características fenomenológicas

Os ciclones são equipamentos amplamente utilizados no controle da poluição do ar e recuperação de produtos com alto valor agregado.

O desempenho de ciclones tem sido amplamente estudado na literatura (IOZIA & LEITH (1990); LEITH & LICHT (1972); CLIFT et al. (1991); LI & WANG (1989); KIM & LEE (2001)), produzindo diversas teorias que se baseiam em hipóteses simplificadoras distintas. Portanto, as teorias estão baseadas em modelos simplificados ou dependem de equações empíricas, sendo válidas apenas em certas condições operacionais. Dessa forma, o estudo de ciclones é, ainda, em grande parte, baseado em métodos experimentais. A Teoria de Lapple (1951) assume que o desempenho de um ciclone pode ser especificado

em termos do diâmetro de corte (dpc), definido como o tamanho de partículas que o ciclone irá coletar com uma eficiência de 50%.

Os principais parâmetros relacionados ao projeto e desempenho dos ciclones são 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.

Como a força inercial é usada, geralmente as partículas com diâmetro aerodinâmico maior que 5 μm 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.

2.3 Tipos de ciclones

O projeto e dimensionamento de ciclones têm sido tradicionalmente baseados em “famílias” de geometrias. Heumann (1991) sugere uma regra básica no dimensionamento de ciclones: utilizar sempre ciclones cujo desempenho já tenha sido determinado ou verificado através de testes em ciclones da mesma “família”, ou seja, com a mesma geometria. Estas famílias de ciclones caracterizam-se por razões fixas entre as oito dimensões chaves do ciclone (ver Figura 2.1). As mais conhecidas são a “família Stairmand” e a “família Lapple”, apresentando-se na Tabela 2.1 as características destas duas geometrias de ciclone.

Tabela 2.1 – Principais relações geométricas dos ciclones Lapple e Stairmand

Dimensões	Lapple	Stairmand
b/Dc	0,25	0,20
Ds/Dc	0,50	0,50
Le/Dc	0,50	0,50
Lc/Dc	2,00	1,50
Ls/Dc	0,62	0,50
Lco/Dc	2,00	2,50
DI/Dc	0,25	0,37

Fonte: Massarani, 2002.

A vantagem de se utilizar esses modelos tradicionais é o grande número de estudos realizados por vários autores.

2.3.1 Diâmetro de corte e eficiência global de separação

Diversos autores investigaram a duração teórica do movimento das partículas no ciclone e fizeram uma previsão teórica do desempenho do equipamento. Várias expressões teóricas e empíricas têm sido propostas para prever a eficiência global de separação de um ciclone, mas os métodos experimentais ainda são confiáveis.

Na prática, o que se especifica no projeto é a eficiência de separação desejada para partículas de um determinado diâmetro, chamado de diâmetro de corte.

Diâmetro de corte

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 (dp_c) (LAPPLE, 1951).

A expressão empírica mais satisfatória para a determinação do diâmetro de corte de um ciclone é a de Rosin, Rammler e Intelmann:

$$dp_c = \left[\frac{9\mu b}{2\pi Ne v_e (\rho_s - \rho_g)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Onde:

μ = viscosidade do gás;

b = largura da entrada do ciclone;

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

v_e = velocidade de entrada do gás no ciclone;

ρ_s e ρ_g = densidades do sólido e do gás, respectivamente.

De acordo com a Equação (2.1), verifica-se que o diâmetro de corte de um ciclone depende das propriedades do sólido, das propriedades do gás, do tamanho do ciclone e das condições

operacionais. Estas condições operacionais dependem do tipo de ciclone a ser utilizado.

Para um ciclone Lapple, as velocidades recomendadas situam-se na faixa de 6 e 21 m/s, sendo de 15 m/s a velocidade usualmente recomendada. Para o ciclone Stairmand, o intervalo está entre 6 e 30 m/s (MASSARANI, 1997).

Eficiência global de separação

A eficiência global de separação de um ciclone é influenciada pelas condições operacionais, pelas propriedades físicas do material particulado alimentado e pela geometria do ciclone.

A eficiência global de separação de um ciclone é definida como a razão entre, a massa de sólidos retidos na saída inferior (*underflow*) e a massa de sólidos alimentados no ciclone, de acordo com a equação (2.2) apresentada abaixo:

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

Onde:

η = eficiência do ciclone;

m_s = vazão mássica de sólidos na saída inferior (*underflow*);

m_e = vazão mássica de entrada de sólidos.

Há muitos estudos teóricos e experimentais para se determinar a eficiência de coleta dos ciclones.

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 & GOLDSTEIN, 2000). Para determinar a influência da concentração de sólidos na eficiência de coleta, Mothes & Loffler (1988) mediram-na com várias concentrações de sólidos pesando as partículas no funil. Hoffman et al. (1992) também obtiveram a eficiência dessa maneira. Zhao & 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 & 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.

Contudo na prática, Stairmand (1951) afirma que um número considerável de partículas, menores 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 d_{pc} são arrastadas junto com o gás limpo sendo carregados pelo vórtex.

2.3.2 Queda de pressão no ciclone

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

Shepherd e Lapple (1939) consideram que as perdas por energia cinética são as mais importantes dentro do ciclone e que são as únicas que se deveria levar em consideração.

Koch & Licht (1977), baseados em revisão e comparações feitas por outros autores apresentam a equação proposta por Shepherd & Lapple (1939) como sendo a mais simples e, que proporciona resultados tão bons quanto às equações mais complexas.

A perda de carga pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\Delta P = \frac{\xi \rho V_e^2}{2} \quad (2.3)$$

Onde:

ξ = fator constante para cada tipo de ciclone;

V_e = velocidade de entrada do gás;

ρ = 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 :

$$\xi = \frac{16Leb}{Ds^2} \quad (2.4)$$

Fornecendo a queda de pressão em Pa, sendo Le , b e Ds , as dimensões do ciclone, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Lintlejohn, 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).

2.4 Caracterização das partículas

As partículas sólidas são de difícil caracterização devido, principalmente, ao seu formato irregular. Desta forma, torna-se necessário associar à partícula alguma dimensão característica conhecida. Estas dimensões podem ser os diâmetros característicos de esferas que apresentam, o mesmo volume, mesma área ou mesma velocidade terminal que a partícula.

2.4.1 Granulometria das partículas

A análise granulométrica permite classificar um conjunto de partículas baseada na distribuição por tamanhos. Esta distribuição pode ser caracterizada por uma fração em massa de partículas (X) com diâmetro menor que D (diâmetro característico de cada análise). O conhecimento das distribuições granulométricas dos sólidos na entrada e nas saídas de equipamentos de separação sólido-gás é fundamental para a determinação da eficiência de separação destes. As análises

granulométricas podem ser feitas por diversas técnicas experimentais sendo as mais simples o peneiramento.

Existem também equipamentos mais sofisticados e caros que permitem efetuar uma análise granulométrica com boa precisão, como o equipamento Malvern Mastersizer. Neste trabalho a técnica utilizada para a determinação da distribuição granulométrica do material particulado em estudo foi a técnica do peneiramento.

2.4.2 Modelos de ajustes de distribuição granulométrica

Em escala industrial, grande quantidade de partículas e pó, que não são uniformes, principalmente quanto ao tamanho, são manuseadas nos mais diferentes e diversos processos. Nesses processos é de grande importância o conhecimento do comportamento deste material particulado, sendo freqüentemente necessário definir o sistema particulado como um todo. Assim, em lugar de um único tamanho de partícula, tem-se a necessidade de se conhecer a distribuição de tamanho de partículas, através da qual é possível definir diâmetros “médios” que possam representar o comportamento de todos os tamanhos do material particulado em questão.

No ajuste de modelos de distribuição de partículas preferem-se modelos com menor número de parâmetros. Assim os modelos a 2 parâmetros têm sido usados para descrever a distribuição de tamanho de partículas, podendo ser representadas pelos seguintes modelos: Gates-Gaudin-Schumann (GGs), Rosin-Rammler-Bennet (RRB) e Log-Normal (LN).

O ajuste de Gates-Gaudin-Shumann (GGs)

O modelo GGS caracteriza-se por possuir dois parâmetros conforme mostra a Equação (2.5).

$$X = \left(\frac{D}{K} \right)^m \quad (2.5)$$

Onde: k e m são os parâmetros do modelo.

X = Fração Cumulativa

D = Diâmetro da Partícula

O ajuste log-normal

O ajuste Log-Normal é representado pela Equação (2.6) abaixo:

$$X = (1 + \operatorname{erf}(z)) / 2 \quad (2.6)$$

Onde: $Z = \ln(D/D_{50}) / (\sqrt{2} \ln \delta)$

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

Onde D_{50} e δ são os parâmetros do modelo.

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

O ajuste de Rosin-Rammler-Bennet (RRB)

O modelo RRB é caracterizado por possuir dois parâmetros ajustáveis. É uma função simples que relaciona diretamente o diâmetro D da partícula com a fração em massa de partículas com diâmetros menores que D , conforme mostra a Equação (2.7).

$$X = 1 - e^{-(D/D')^n} \quad (2.7)$$

Onde: n e D' são os parâmetros do modelo.

X = Fração Cumulativa

D = Diâmetro da Partícula

2.5 Visão geral das técnicas numéricas de CFD (Computational Fluid Dynamics)

O recente avanço na capacidade de processamento dos computadores, bem como o surgimento de modernas técnicas numéricas, tem produzido um aumento no uso da simulação fluidodinâmica computacional. A complexidade das equações de conservação de quantidade de movimento, energia e massa, e outras equações (equações cúbicas de estado, correlações empíricas, taxas de reações químicas) tornavam, há apenas poucas décadas atrás, inviável a

solução de uma série de problemas de engenharia, devido à baixa capacidade computacional.

A modelagem é a área que analisa os processos, identifica os fenômenos e leis que regem os processos e assim elabora um modelo matemático para sua descrição. A partir deste modelo, elaboram-se códigos computacionais para proceder às simulações e obtenção das soluções dos problemas analisados.

Geralmente problemas complexos demandam forte esforço de cálculo, devido à robustez dos modelos matemáticos. Portanto, a abordagem matemática deve ser feita de forma individual, de maneira a estabelecer quais são as hipóteses simplificadoras cabíveis a cada problema.

Os problemas considerados em engenharia são, em sua maioria, complexos e de difícil solução do sistema de equações resultantes da modelagem do problema, sendo ainda composto de um elevado número de variáveis. Para resolução destes sistemas, adota-se o uso de métodos numéricos associados à ferramenta computacional, o que torna o desenvolvimento dessa ferramenta muito relevante.

A técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD) tem se destacado nas aplicações da área de engenharia, especialmente em mecânica dos fluidos. Pacotes comerciais contendo modelos clássicos da literatura, que estabelecem relações para as principais variáveis relacionadas ao escoamento de fluidos e o transporte de calor e massa, têm viabilizado a simulação de problemas considerados de resolução complexa, como sistemas reacionais, sistemas multifásicos, perfis aerodinâmicos, dentre outros.

Segundo Massah e Oshinowo (2000), algumas das principais vantagens do *CFD* são:

- Grande flexibilidade para mudar os parâmetros de projeto sem a despesa de mudanças de hardware. Tem custo inferior ao de laboratórios ou experiências de campo, permitindo aos engenheiros realizar outras tentativas e avaliar novas possibilidades de projeto;
- Tem um tempo de resposta mais rápido do que o das experiências;
- Guia o engenheiro à raiz dos problemas diminuindo os erros estimados;
- Fornece informações relevantes sobre os perfis do escoamento, especialmente em regiões onde as medidas são de difícil obtenção.

Cabe, entretanto ressaltar, que simulações necessitam de verificação e validação experimental.

Basicamente, existem três maneiras de se resolver um problema envolvendo mecânica de fluidos e processos de transferência de calor e massa: métodos analíticos, métodos numéricos e métodos experimentais.

Os métodos analíticos são aqueles cujas soluções obtidas podem ser expressas como funções matemáticas conhecidas. O grande problema dos métodos analíticos é que são aplicáveis a casos muito simples que geralmente não acontecem na maioria dos processos de interesse. Normalmente, muitas hipóteses simplificativas devem ser feitas de forma a obter-se uma solução exata, e isto causa um afastamento da descrição real do problema.

Os métodos numéricos, por sua vez, foram à grande solução de muitos problemas da engenharia e das ciências exatas como um todo, pois conseguem aquilo que os métodos analíticos são incapazes: resolver problemas cuja complexidade é bem maior, sob as mais variadas condições. Isto, aliado aos pacotes de geometria embutidos em simuladores presentes no mercado, permite uma visualização simples do fenômeno físico, sob variadas condições. Nem todas as técnicas numéricas existentes são apropriadas para todos os tipos de problemas e, desta forma, a escolha de uma ou mais técnicas dependerá fortemente do tipo de problema que se deseja resolver.

Os métodos experimentais possuem a vantagem de lidar com sistemas reais, quando muitas dificuldades estão envolvidas, impedindo o uso de técnicas analíticas e/ou numéricas, a experimentação apresenta-se como o único caminho possível. Comparando-se os três métodos em termos de custo, os experimentais, em geral, são os mais onerosos, pois envolvem muitos gastos com equipamentos e energia. Os métodos analíticos possuem custo praticamente zero, uma vez que a grande maioria das técnicas é de conhecimento público e foram desenvolvidas há anos e encontram-se bem consolidadas. Os métodos numéricos, por sua vez, possuem apenas custo computacional, muito inferior aos custos da experimentação.

2.6 Estado da arte na simulação de ciclones pela técnica CFD

Com a utilização de ciclones em novos processos, como reatores para reações rápidas, equipamentos para troca térmica, secadores e para separação gás-sólido, por exemplo, surge a necessidade de um

conhecimento mais profundo sobre o campo de velocidade, o campo de pressão e a turbulência em ciclones, de forma a permitir a otimização do desempenho do equipamento. Este nível de conhecimento só é possível com a solução completa das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento, sujeitas a um modelo de turbulência. Surgiram, então, as modernas técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) como ferramentas para a obtenção de soluções numéricas completas que permitem a predição de fenômenos como a reversão de escoamento, o escoamento de alta vorticidade, a existência de zonas de recirculação, entre outros (MEIER e MORI, 1997).

A primeira aplicação das técnicas de CFD para a simulação de ciclones com modelo euleriano-lagrangeano, foi apresentada por Boysan et al. (1982), em que os autores utilizaram as equações médias temporais de Navier- Stokes para a fase contínua acopladas a um modelo de turbulência anisotrópico, por intermédio da combinação do modelo k- ϵ padrão e um modelo de tensões algébricas. Os resultados obtidos foram comparados com os existentes na literatura, sendo que as eficiências foram comparadas com as obtidas por Stairmand (1951). Os resultados obtidos mostram satisfatória concordância para predizer o escoamento de gás, a queda de pressão e os perfis de velocidade tangencial e axial, além da eficiência de coleta.

A partir do trabalho pioneiro de Boysan et al. (1982), diversas tentativas com o intuito de melhorar a representação dos campos de velocidades com modificações dos modelos de turbulência são encontradas na literatura. Dentre os trabalhos, segue abaixo:

Pericleous (1987) apresentou um modelo hábil utilizando as equações de Navier- Stokes para prever perfis de velocidade de mistura e a distribuição das partículas assim como a queda de pressão e a eficiência de separação para predição do escoamento bifásico em hidrociclones. No modelo de turbulência os tensores de Reynolds foram modelados a partir de um modelo isotrópico baseado em uma simplificação da teoria do comprimento de Prandtl. A modelagem matemática descrita foi desenvolvida utilizando 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 ciclones, mostrando-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

com relação à turbulência, que é causada 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- ϵ 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- ϵ padrão, enquanto que a viscosidade tangencial foi calculada por uma expressão para o comprimento de mistura. Este trabalho mostrou que o modelo k- ϵ 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- ϵ padrão, é que a expressão para o comprimento de mistura utiliza uma constante empírica adicional.

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- ϵ padrão. 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). 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.

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.

Cristea et al. (1994) apresentaram um estudo de simulação tridimensional em um ciclone. Foi utilizado pela primeira vez o 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 $k-\epsilon$ 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 gás-sólido bifásico, 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 SIMPLEX para o acoplamento pressão – velocidade.

Hoffmann et al. (1995) destacaram que o modelo de turbulência $k-\epsilon$ 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.

Avereous 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) avançou significativamente na representação do escoamento no interior ciclônico, desenvolvendo um código computacional específico para ciclones, utilizando o método dos volumes finitos, denominado CYCLO. O código emprega três modelos distintos, um para a simulação do escoamento do gás sem a presença de particulados - Modelo Euleriano Monofásico Bidimensional (EMB), e os outros dois dedicados ao escoamento gás-particulados, sendo um com abordagem Euleriana - Modelo Euleriano-Euleriano Bifásico Bidimensional (EEBB) e o outro Lagrangeana - Modelo Euleriano-Euleriano-Lagrangeano Bidimensional (EELB), com acoplamento pressão-velocidade (fluido incompressível) pelo método SIMPLEC e malha numérica deslocada para a solução das equações provenientes dos três modelos. O autor comparou os resultados obtidos nas simulações com quatro estudos de caso retirados da literatura e observou que o código desenvolvido forneceu importantes subsídios aos estudos de melhoria de desempenho de ciclones, quantificada, principalmente, por reduzida queda de pressão e elevada eficiência de coleta.

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 fluante 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 $k-\epsilon$ para prever a viscosidade turbulenta dos tensores de Reynolds da fase fluida. Para as componentes tangenciais do tensor de Reynolds 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 nula 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 possuem característica anisotrópica.

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 $k-\epsilon$ padrão, o RNG- $k-\epsilon$ (*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 as características do escoamento, aumentando as velocidades axial e tangencial. Para a simulação foi usado o código computacional FLUENT V4.7 que usam o método dos volumes finitos, uma malha de 15000 células e esquema de interpolação *quick*, tendo como resultado que tanto o modelo $k-\epsilon$ quanto o modelo RNG $k-\epsilon$, quando usados para diâmetros grandes de duto de saída de gás, obtiveram resultados acima dos encontrados experimentalmente, sendo que o modelo RNG $k-\epsilon$ 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 ICEM 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 vórtice 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 (2002) avaliou 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 utilizado 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 coordenado 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 utilizado foi o modelo Reynolds Stress Model (RSM). 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 e 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.

Zhao et al. (2006) propuseram e simularam um ciclone de entrada dupla em espiral, comparando-o ao equipamento convencional. Utilizaram o código Fluent, com o modelo de turbulência RSM e o rastreamento de partículas Lagrangeano. Boa concordância com os dados experimentais foi atingida, sendo que o novo projeto se mostrou superior, ou seja, o aumento da simetria do padrão de escoamento do gás melhorou a performance do equipamento.

Bernardo et al. (2006) estudaram a influência da inclinação do ângulo de entrada de 30, 40 e 60 graus do ciclone na eficiência de coleta, utilizando a modelagem Euleriana-Lagrangeana. O modelo de turbulência utilizado foi o RSM, que teve sua performance aprovada. Foi visto que, para o caso estudado, todas as configurações proporcionavam menor queda de pressão e maior eficiência de coleta, sugerindo ainda a existência de uma ótima.

Hussmann et al. (2007) implementaram um modelo Lagrangeano de colisão partícula- partícula para escoamentos densos no código CFX, elevando a modelagem ao chamado acoplamento de quatro vias. Para tanto, uma sub-rotina é implementada que calcula localmente a frequência e probabilidade de colisão. A validação é feita em três geometrias diferentes, e apesar de não incluírem um ciclone, uma questão de tempo para que sua aplicação se estenda a este ponto.

Vegini et al. (2008) propuseram a verificação e validação do código CYCLO com seu modelo multifásico euleriano-euleriano e todas as hipóteses simplificadoras, até a apresentação de aplicações práticas do uso das técnicas de CFD. Para a verificação e validação do código, os resultados obtidos numericamente são comparados com valores experimentais para o escoamento monofásico e para o escoamento multifásico. Como exemplo de aplicação prática das técnicas de CFD, é apresentada a utilização do código na análise e projeto de ciclones industriais dispostos em serie, apresentando diferentes geometrias e operados a alta temperatura e com alta carga de sólidos.

Através do material apresentado verifica-se que a maioria dos autores utiliza uma abordagem Lagrangeana para a fase particulada. Poucos trabalhos apresentam aplicação com abordagem Euleriana-Euleriana, sendo este um aspecto positivo e interessante deste trabalho.

No próximo capítulo é apresentada a modelagem matemática para o modelo euleriano-euleriano bifásico e o método numérico utilizado para a resolução das equações do modelo proposto neste trabalho.

CAPÍTULO 3 - MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo será apresentada uma modelagem matemática para o escoamento euleriano-euleriano bifásico gás-sólido em ciclones. Os modelos de turbulência, as hipóteses simplificadoras, as equações constitutivas e as condições de contorno empregadas ao fechamento do modelo serão propostas e discutidas, bem como o código CFD utilizado para a resolução das equações do modelo proposto por MEIER (1998).

3.1 Modelo euleriano-euleriano bifásico (EEB)

A abordagem Euleriana considera ambas as fases, sólida e gasosa, como sendo duas fases distintas, interagindo entre si, e induzindo à interpenetrabilidade das fases, onde ambas as fases são contínuas e possuem propriedades de estado distintas na mesma localização espaço-tempo.

No modelo multifásico gás-sólido existe a presença de dois fluidos, o hipotético e o real, que admitem transferência de massa e movimento. O fluido hipotético é aquele que adquire comportamento fluidodinâmico devido às interações físico-químicas com o fluido real. A fase gás é denominada como fluido real e a fase sólida é denominada como fluido hipotético.

As equações fundamentais da fluidodinâmica são a equação da conservação da massa (*continuidade*) e as equações do movimento (*momento*).

Particularmente, as principais hipóteses simplificadoras adotadas para a modelagem do escoamento gás-sólido são:

- Adoção de um diâmetro médio para a caracterização da fase sólida;
- Ausência de tensões turbulentas na fase sólida (modelo invíscido);
- Turbulência anisotrópica para a fase gasosa, predita pela combinação do modelo k- ϵ padrão para os componentes axiais e radiais, e o modelo de comprimento de mistura de Prandtl para os componentes tangenciais;
- A força de pressão atua somente sobre a fase gasosa;

- A transferência de quantidade de movimento na interface é predita pela adoção de um modelo constitutivo de força de arraste;
- O escoamento é considerado incompressível e isotérmico;
- Simetria no eixo (axial) e aplicação de um modelo 3D-Axissimétrico.

3.2 Equações de conservação

As equações de conservação, tanto as equações de massa quanto as equações de movimento para o modelo euleriano-euleriano bifásico (gás-sólido), podem ser descritas conforme equações (3.1 a 3.4) apresentadas abaixo, sendo que, no escoamento bifásico (gás-sólido), devido à presença do fluido hipotético (sólido) é necessário um fator de correção nestas equações que considera a influência de cada fase no escoamento. Este fator que considera esta influência é a fração volumétrica de cada fase.

- Equação da conservação da massa total para a fase gás:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g v_g) = 0 \quad (3.1)$$

- Equação da conservação da massa total para a fase sólida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_s \rho_s) + \nabla \cdot (f_s \rho_s v_s) = 0 \quad (3.2)$$

- Equação da quantidade de movimento para a fase gás:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g v_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g v_g v_g) = -f_g \nabla \cdot (T_g^{ef}) + f_g \rho_g g - \nabla p + (F_{res})_{g-s} \quad (3.3)$$

- Equação da quantidade de movimento para a fase sólida:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (f_s \rho_s v_s v_s) = f_s \rho_s g - (F_{res})_{g-s} \quad (3.4)$$

Onde: ρ é a massa específica para cada fase, tanto sólida como gás, \mathbf{v} é o vetor velocidade de cada fase, f é a fração volumétrica de cada fase, \mathbf{T}^{ef} é a tensão cisalhante (efetiva) que atua sobre o fluido real, \mathbf{g} é o campo gravitacional, p é a pressão atuante em cada fase, $(\mathbf{F}_{res})_{g-s}$ é o termo de interação entre a fase gás e a fase sólida.

3.3 Equações constitutivas

Para o fechamento do modelo descrito anteriormente, são necessários os modelos de turbulência para caracterizar matematicamente o fluxo turbulento de massa e o tensor de Reynolds. Este tensor turbulento relaciona as flutuações com as propriedades médias temporais.

3.3.1 Modelo de turbulência

Para representar o escoamento vorticial em ciclones, um modelo anisotrópico híbrido de turbulência foi desenvolvido por Meier (1998), formado por uma combinação entre o modelo de duas equações (k - ϵ padrão) e o modelo de zero equações (comprimento de mistura de Prandtl). Este modelo é atualmente utilizado pelo código CYCLO-HEXA e será apresentado a seguir.

O modelo de turbulência é baseado na aproximação de Boussinesq, que em analogia com a lei da viscosidade de Newton, assume que o tensor de Reynolds é proporcional ao gradiente de velocidade média. Para um fluido incompressível, em que todas as propriedades do fluido são constantes, este conceito pode ser escrito como:

$$\mathbf{T}_g^{ef} = -2\mu^{ef} \mathbf{D}_g \quad (3.5)$$

onde μ^{ef} é viscosidade efetiva e \mathbf{D}_g é a taxa de deformação.

A taxa de deformação é dada por:

$$\mathbf{D}_g = \frac{1}{2} \left[\nabla \mathbf{v}_g + (\nabla \mathbf{v}_g)^T \right] \quad (3.6)$$

E a viscosidade efetiva é expressa como:

$$\mu^{ef} = \mu_g + \mu_g^{(t)} \quad (3.7)$$

onde μ_g é a viscosidade molecular e $\mu_g^{(t)}$ é a viscosidade turbulenta.

Na Equação (3.7), a viscosidade turbulenta, $\mu_g^{(t)}$, pode ser predita de forma anisotrópica através de uma combinação do modelo k-e padrão para os componentes axiais e radiais, e o modelo do comprimento de mistura de Prandtl para os componentes tangenciais. Em coordenadas cilíndricas, o modelo de Prandtl para a predição da viscosidade turbulenta dos componentes tangenciais pode ser escrito como segue:

$$(\mu^{(t)})_{\theta,\theta} = (\mu^{(t)})_{r,\theta} = (\mu^{(t)})_{z,\theta} = (\mu^{(t)})_{in} + \rho_g r^2 l^2 \left\{ \left[\left(\frac{\partial u_g}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{u_g}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w_g}{\partial z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_g}{\partial z} + \frac{\partial w_g}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_g}{\partial z} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.8)$$

Onde o primeiro termo no lado direito da equação (3.8), $(\mu^{(t)})_{in}$, representa um termo de convecção de turbulência associada a corrente de entrada no ciclone (Pericleous, 1987), e l é o comprimento de mistura de Prandtl.

Uma correlação para $(\mu^{(t)})_{in}$ sugerida por Pericleous (1987) é:

$$(\mu^{(t)})_{in} = \rho_g (k_g)^{1/2} \frac{D_h}{10} \quad (3.9)$$

onde k_g é a energia cinética turbulenta na entrada do ciclone, e D_h é o diâmetro hidráulico da seção de entrada do ciclone.

Duggins e Frith (1987), Pericleous (1987), Davidson (1988), Dyakowski e Willians (1993) e Silva e Nebra (1994) sugeriram um valor para o comprimento de mistura l na faixa de 0,028 a 0,034. Nos vários experimentos numéricos realizados para validação do código CYCLO, o valor para $l = 0,028$ foi o que apresentou os melhores resultados e, portanto, este valor foi adotado pelo código CYCLO como padrão.

Os componentes axiais e radiais da viscosidade turbulenta podem ser calculados pelo modelo k-e padrão:

$$(\mu^{(t)})_{r,z} = (\mu^{(t)})_{r,r} = (\mu^{(t)})_{z,z} = C_\mu \rho_g \frac{k_g^2}{\epsilon_g} \quad (3.10)$$

Onde C_μ é uma constante empírica do modelo, k_g é a energia cinética turbulenta e ϵ_g sua taxa de dissipação. Para completar o modelo são necessárias ainda duas equações adicionais de conservação, uma para k_g e outra para ϵ_g :

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g v_g k_g) = f_g \nabla \cdot \left(\frac{\mu^{ef}}{\sigma^k} \nabla k_g \right) + f_g (G_g - \rho_g \epsilon_g) \quad (3.11)$$

e

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_g \rho_g \epsilon_g) + \nabla \cdot (f_g \rho_g v_g \epsilon_g) = f_g \nabla \cdot \left(\frac{\mu^{ef}}{\sigma^\epsilon} \nabla \epsilon_g \right) + f_g (C_1 G_g - C_2 \rho_g \epsilon_g) \frac{\epsilon_g}{k_g} \quad (3.12)$$

Onde σ^k , σ^ϵ , C_1 e C_2 são constantes do modelo e G_g é a geração de energia cinética turbulenta que pode ser calculada como:

$$G_g = -T_g^{(t)} : \nabla v_g \quad (3.13)$$

A Tabela 3.1 apresenta os valores das constantes empíricas do modelo k-ε padrão.

Tabela 3.1 – Constantes do modelo k-ε

Constante	C_μ	C_1	C_2	σ^k	σ^ϵ
Valor	0,09	1,44	1,92	1	1,3

Fonte: Meier, 1998.

3.3.2 Interação entre as fases (gás-sólido)

A força resistiva entre as fases pode ser modelada pela seguinte equação:

$$F_{\text{res}} = \beta_{g,s} (v_g - v_s) \quad (3.14)$$

Onde $\beta_{g,s}$ é o coeficiente de interface entre a fase gás e a fase sólida.

O coeficiente de interface entre as fases (gás-sólido) pode ser expresso tanto para fração volumétrica da fase gasosa $f_g < 0,8$, caracterizando um escoamento em fase densa, como para fração volumétrica da fase gasosa $f_g > 0,8$ para escoamento em fase diluída.

Para escoamento em fase densa através da lei de Darcy (GIDASPOW, 1994), utiliza-se a seguinte equação:

$$\beta_{g,s} = 150\mu_g \left(\frac{f_s}{f_g d_p \phi_p} \right)^2 + 1.75 \frac{\rho_g f_s |v_g - v_s|}{d_p \phi_p} \quad (3.15)$$

Para escoamento em fase diluída, utiliza-se o modelo proposto por Wen e Yuu que relaciona o coeficiente de interface com o coeficiente de arraste (C_D), conforme a equação abaixo:

$$\beta_{g,s} = \frac{3}{4} C_D \frac{f_g \rho_g |v_g - v_s| f_s}{d_p \phi_p} \quad (3.16)$$

Onde d_p é o diâmetro das partículas, ϕ_p é a esfericidade da partícula e $|\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_s|$ é o módulo da velocidade relativa entre as fases (gás-sólido).

Dentre as muitas correlações encontradas na literatura para o cálculo do coeficiente de arraste em função do número de Reynolds, faz-se uso daquela proposta por Massarani (1997), válida para toda faixa de número de Reynolds ($0 \leq Re_p \leq \infty$) como mostra a equação a seguir:

$$C_D = \left[\left(\frac{24}{K_1 Re_p} \right)^{0.85} - K_2^{0.85} \right]^{1.18} \quad (3.17)$$

Onde:

$$K_1 = 0.843 \log_{10} \left(\frac{\phi_p}{0.065} \right) \quad (3.18)$$

$$K_2 = 5.31 - 4.88 \phi_p \quad (3.19)$$

e

$$Re_p = \frac{\rho_g |\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_p| d_p}{\mu_g} \quad (3.20)$$

3.4 Condições iniciais e de contorno

Algumas simplificações são adotadas na solução do modelo matemático proposto anteriormente. As condições de contorno aplicadas em todas as fronteiras do sistema em estudo estão apresentadas na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 – Condições de contorno aplicadas ao modelo EE₁

<i>Condição</i>	<i>Expressão Matemática</i>
Entrada	v_g e v_{sk} prescritas f_g e f_{sk} prescritas k_g e ϵ_g prescritas
aída no “Vórtex FINDER”	$\frac{\partial}{\partial z}(v_g) = \frac{\partial}{\partial z}(v_{sk}) = 0 \quad \frac{\partial f_g}{\partial z} = \frac{\partial f_{sk}}{\partial z} = 0$ $\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial k_g}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon_{sk}}{\partial z} = 0$
Saída no “Underflow”	$\frac{\partial}{\partial z}(v_g) = \frac{\partial}{\partial z}(v_{sk}) = 0 \quad \frac{\partial f_g}{\partial z} = \frac{\partial f_{sk}}{\partial z} = 0$ $\frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial k_g}{\partial z} = \frac{\partial \epsilon_{sk}}{\partial z} = 0$
Parede	<p>Não-deslizamento Deslizamento livre</p> $v_g = 0 \quad \left. \frac{\partial v_{sk}}{\partial \xi} \right _{\text{parede}} = 0$ <p>Funções de parede para $v_g \theta = 0$ e k_g e ϵ_g</p>
Simetria	$\frac{\partial v_g}{\partial r} = \frac{\partial v_{sk}}{\partial r} = \frac{\partial v_p}{\partial r} = \frac{\partial k_g}{\partial r} = \frac{\partial \epsilon_g}{\partial r} = 0$ $\frac{\partial f_g}{\partial r} = \frac{\partial f_{sk}}{\partial r} = 0$

A Figura 3.1 ilustra as fronteiras de aplicação das condições de contorno citadas acima (borda direita e superior em destaque nas caixas de texto).

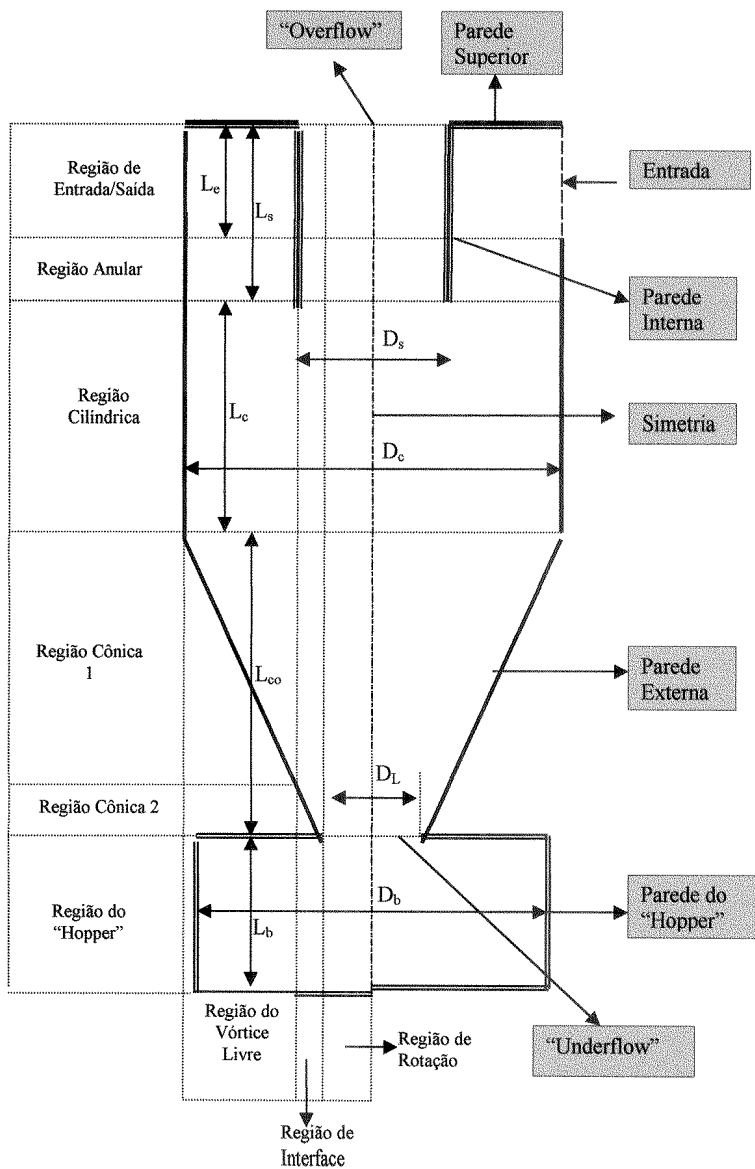


Figura 3.1 – Desenho esquemático de um ciclone

Com a modelagem matemática apresentada acima, no capítulo seguinte é apresentado o código CFD utilizado para resolução das equações do modelo bifásico (EE_1) proposta neste trabalho.

CAPÍTULO 4 - O CÓDIGO DE CFD CYCLO-HEXA

Atualmente existe uma variedade de programas e pacotes computacionais que são usados na resolução de uma grande quantidade de problemas. Apesar de existirem diferenças entre os programas, todos eles são baseados nos mesmos princípios físicos e matemáticos e, o que muda, muitas vezes, de um para outro é a forma de implementação numérica e o tratamento gráfico das soluções.

Neste trabalho, o código computacional utilizado para a resolução das equações foi o CYCLO-HEXA, que é um código de fluidodinâmica computacional dedicado exclusivamente para a predição do desempenho de ciclones.

4.1 Código CYCLO-HEXA

O código CYCLO-HEXA é dividido em três módulos: pré-processador, processador e pós-processador.

Módulo do pré-processador: É responsável pela criação de um arquivo de comando no qual é prescrito o tipo de problema a ser solucionado, o sistema de coordenadas (para o caso em estudo foi utilizada coordenada cilíndrica), as condições de contorno, os algoritmos de solução e seus parâmetros. A Figura 4.1 apresenta o processo de construção da malha numérica no pré-processador, onde a geometria e o tamanho da malha são estabelecidos para geração do arquivo da malha (malha.dat) a ser utilizado pelo processador.

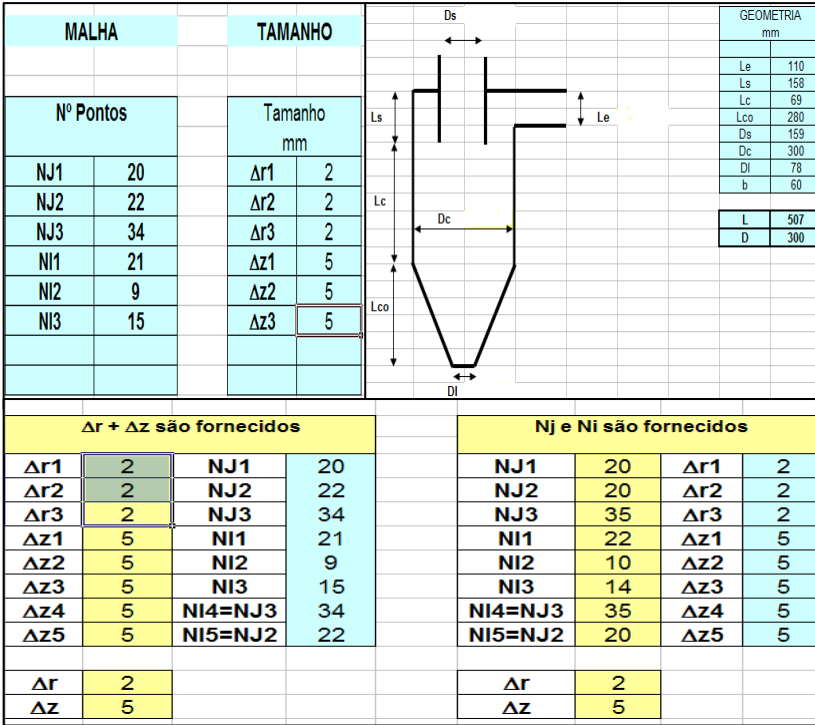


Figura 4.1 – Planilha malha _ pdr

Conforme já descrito anteriormente, a malha numérica deverá ser gerada através do módulo de pré-processamento. A Figura 4.2 apresenta visualmente como o andamento da solução é acompanhado.



Figura 4.2 – Montagem da malha numérica

Módulo Processador: Com as informações da malha numérica, o módulo do processador é utilizado para a resolução das equações diferenciais que fornecerão resultados macroscópicos e microscópicos.

O procedimento numérico adotado pelo código CYCLO-HEXA para a resolução do modelo matemático apresentado anteriormente, será descrito abaixo de forma resumida. Mais detalhes podem ser encontrados em Meier (1998).

Para a discretização numérica das equações diferenciais é utilizado o método dos volumes finitos. Após a discretização é utilizado o método iterativo linha por linha com TDMA para a solução do sistema algébrico, ou seja, sistema de equações não-lineares. Para o acoplamento pressão-velocidade, o programa usa o algoritmo SIMPLEC para a solução segregada de equações. Para interpolação e definição das variáveis nas faces dos volumes de controle são utilizadas as equações UDS e WUDS. A malha numérica adotada foi uma malha ortogonal, regular e em coordenadas cilíndricas. Para distribuição dos pontos na malha adotou-se o procedimento de malha deslocada, onde as variáveis do modelo são calculadas em posições diferentes da malha.

Módulo Pós-Processador: Permite a visualização gráfica do andamento da solução através do acompanhamento de algumas variáveis. Além disso, prepara todos os arquivos de resultados para posterior análise e visualização científica. A Figura 4.3, gerada através do módulo de pós-processamento, apresenta informações que podem ser

acompanhadas durante a execução do programa CYCLO-HEXA. A temperatura, pressão, fração volumétrica, velocidade tangencial e radial do gás e do sólido, são informações microscópicas que podem ser acompanhadas através dos sensores virtuais localizados nas regiões cilíndricas e cônicas do ciclone. Parâmetros globais (perda de carga, eficiência de coleta e massa de sólidos), e parâmetros de convergência são também visualizados.

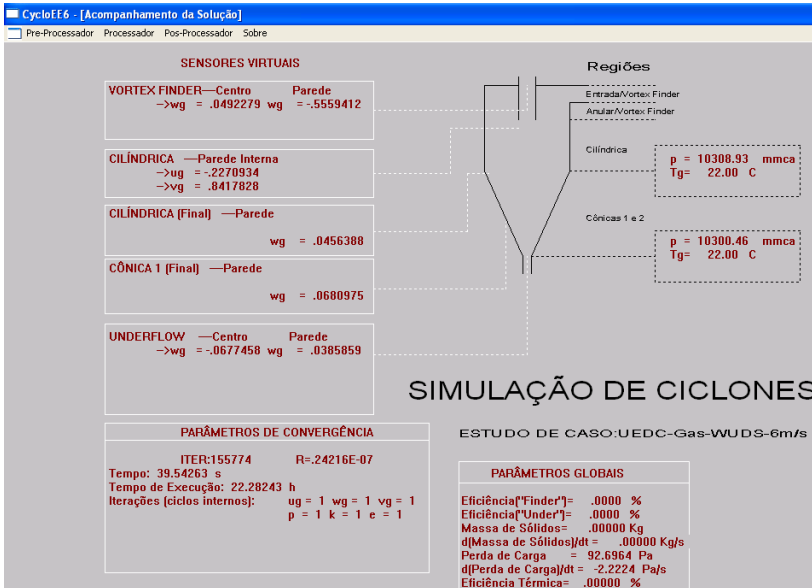


Figura 4.3 – Tela de acompanhamento do código CYCLO-HEXA

Os resultados podem também ser obtidos na forma de mapas de cores, vetores e animações gráficas para visualizar o comportamento do fluxo no ciclone. Estas visualizações gráficas são obtidas com o software ORING que são apresentadas no capítulo 6.

No próximo capítulo veremos os materiais e métodos utilizados neste trabalho para utilização do modelo bifásico (EE_1) implementado no código CYCLO-HEXA apresentado anteriormente.

CAPÍTULO 5 - MATERIAIS E MÉTODOS

Será apresentada neste capítulo, uma descrição detalhada dos principais componentes da unidade experimental utilizada e da caracterização do sólido. Serão detalhados também os procedimentos empregados na realização dos experimentos.

5.1 Material particulado

O material particulado utilizado nos experimentos físicos desta dissertação é o iodato de cálcio ($\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$), constituído essencialmente de iodo e cálcio e apresenta uma coloração branca.

Determinação da massa específica

A massa específica do sólido (iodato de cálcio) foi determinada experimentalmente através da leitura do volume de água deslocado em uma proveta graduada pela imersão completa de uma massa conhecida do sólido (iodato de cálcio) devidamente pesado em balança analítica com precisão ($\pm 0,01\text{g}$). A massa específica do sólido é a razão da massa do sólido conhecida pelo volume deslocado que este ocupa na proveta.

A massa específica do iodato de cálcio obtida foi de $4,519\text{ g/cm}^3$.

Determinação distribuição granulométrica: Diâmetro médio de Sauter

O diâmetro médio de Sauter foi o diâmetro escolhido para representar o diâmetro médio de cada experimento. O diâmetro médio em superfície, D_s , também conhecido como diâmetro médio de Sauter (D_{32}), é um dos diâmetros médios mais importante, pois é diretamente relacionado com a área superficial por unidade de volume, e com a fração volumétrica da fase dispersa,

Conhecida a análise granulométrica do sólido, obtemos a fração cumulativa de cada diâmetro presente na amostra, sendo possível assim, a determinação da curva de distribuição granulométrica. A curva de distribuição granulométrica com seu respectivo diâmetro médio de sauter foi obtida pelo software ORING.

O diâmetro médio de sauter do iodato de cálcio foi de 52 μm , onde o modelo de ajuste de distribuição granulométrica que melhor representou as partículas do material particulado foi o modelo de Rosin-Rammler-Bennet (RRB) representada pela Figura 5.1 abaixo.

A análise granulométrica do material particulado foi realizada em peneiras da marca *Endecotts* (ISSO 3310-1) com agitador da marca *Bertel*. O resultado da análise granulométrica é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resultado análise granulométrica

Tyler (mesh)	Abertura	Diâmetro	Retenção (g)	Retenção (%)	Fração	Massa	Fração
	Peneira (mm)	Médio (D)			Mássica (FM)	Acumulada	Cumulativa
40	0,425	0,425	0,050	0,013	0,000	0,050	1,000
60	0,250	0,338	0,920	0,234	0,002	0,970	0,948
100	0,150	0,200	21,340	5,446	0,055	22,260	0,959
150	0,106	0,128	57,720	14,730	0,148	79,980	0,722
200	0,075	0,091	92,690	23,655	0,238	172,670	0,537
270	0,053	0,064	74,510	19,010	0,191	247,180	0,301
325	0,045	0,049	59,68	15,23	0,153	306,860	0,194
400	0,038	0,042	44,770	11,430	0,115	351,630	0,127
Fundo	*****	0,019	38,330	9,780	0,098	389,960	*****
Total			390,010	99,528	1,000	389,960	

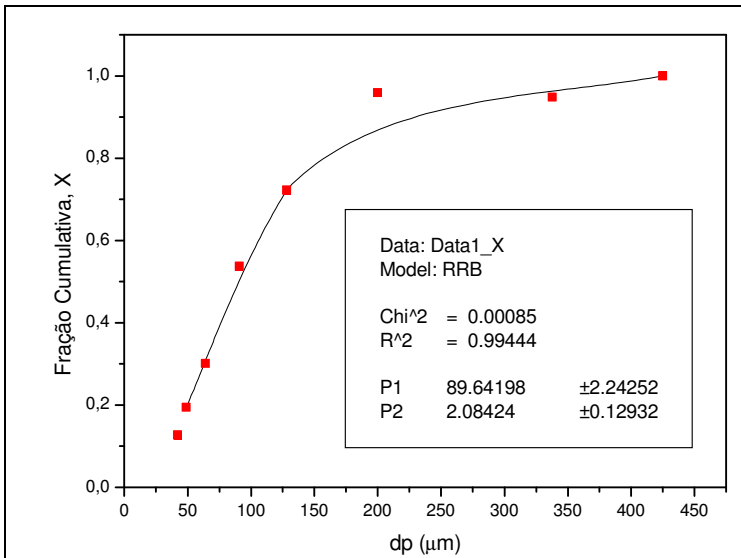


Figura 5.1 – Curva de distribuição granulométrica cumulativa

5.2 Unidade experimental física

A Figura 5.2 ilustra a unidade experimental de dutos e ciclone (UE-DC) utilizada para a realização dos experimentos de eficiência de coleta global e perda de carga no ciclone.

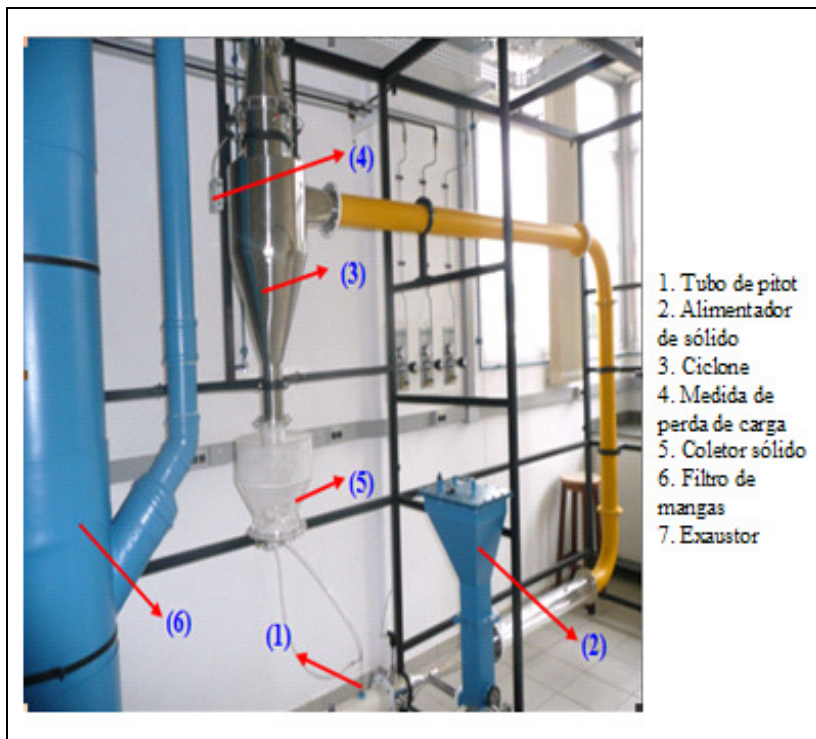


Figura 5.2 – Unidade experimental de dutos e ciclone – UE-DC.

O experimento inicia-se com o acionamento de um inversor de frequência que regula o motor para manutenção de uma vazão constante de ar no sistema. A velocidade do ar na tubulação de 100 mm de diâmetro interno é medida através de um tubo pitot (1) previamente calibrado e acoplado a uma célula de carga para medida da pressão e é utilizado como sensor para controle do tipo proporcional integral visualizado pelo supervisório da unidade experimental. Durante o experimento, a fase sólida é alimentada no sistema com o auxílio do

alimentador do tipo rosca (2) acoplado a um Venturi. O alimentador de sólido é cuidadosamente calibrado no início de cada experimento, verificando-se a vazão mássica de pó alimentada. A queda de pressão entre o duto de alimentação e o duto *overflow* do ciclone é medida através de um manômetro diferencial (4). Finalmente o sólido é coletado no recipiente acoplado ao *underflow* (5) e sua massa é determinada em balança digital com precisão ($\pm 0,01\text{g}$). A partir dos dados da massa de sólidos alimentada no ciclone e coletadas no underflow é determinada a eficiência global de cada experimento através da equação (2.2).

5.2.1 O sistema gerador de pó

O gerador de pó é composto por uma tremonha (1), onde o pó é alimentado e arrastado por uma rosca sem fim (3) para a linha da tubulação da corrente do gás (4). Este gerador de pó está instalado em uma tubulação transversal à linha da corrente de gás e conectado a um Venturi (2) para proporcionar o arraste do pó no sistema, conforme Figura 5.3 abaixo:

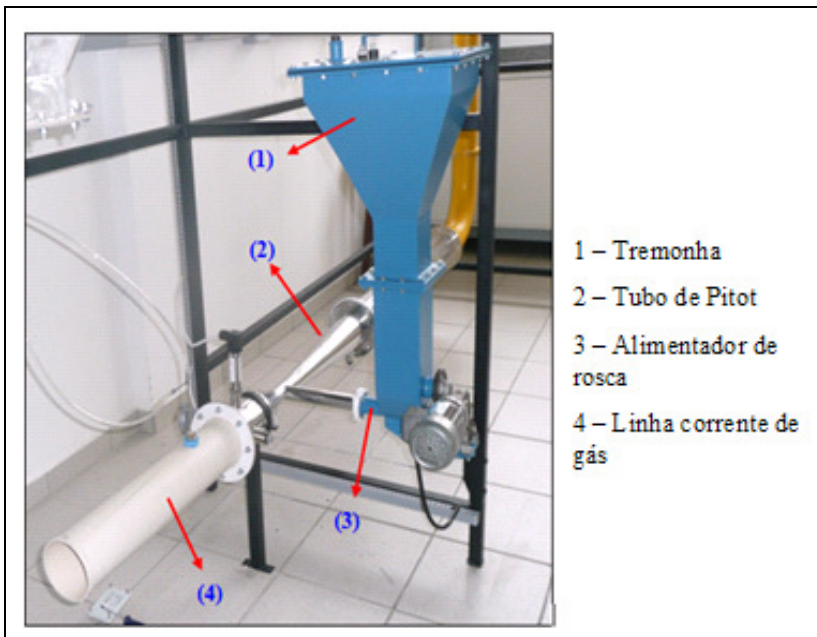


Figura 5.3 – Gerador de pó

5.2.2 Aquisição dos dados experimentais

A UE-DC é operada através de um controlador lógico programável (CLP) e de um software do tipo SCADA (“Software Control and Data Acquisition”) que possibilita a aquisição dos dados experimentais (perda de carga) e o controle das variáveis manipuláveis (velocidade entrada do ciclone, vazão do gás, razão de carga) na operação do escoamento multifásico gás-sólido.

A Figura 5.4 ilustra a tela de acompanhamento da aquisição dos dados experimentais, onde os mesmos são determinados a cada segundo, gerando um arquivo com os dados para posterior análise.



Figura 5.4 – Tela acompanhamento aquisição dados experimentais

A base experimental para o estudo da validação do modelo bifásico desta dissertação é portanto composto por:

- Medidas de velocidade na entrada do ciclone;
- Medidas de razão de carga;
- Medidas de perda de carga no ciclone;

- Medidas de eficiência global de separação;
A eficiência global de separação é medida para cada experimento a partir da massa coletada no “*underflow*” do ciclone.

Medidas de velocidade na entrada do ciclone

O escoamento é iniciado através de um ventilador radial localizado na parte final de toda a linha de escoamento da UE-DC, mantendo assim todo o sistema em depressão. Na região de sucção de ar, início do sistema, há um sensor de velocidade do tipo Pitot, um transmissor de pressão e um transmissor de temperatura (PT 100). Com estas medidas é possível registrar as vazões volumétricas e mássicas da fase gasosa e determinar a velocidade na entrada do ciclone, utilizada para a execução dos experimentos.

O controle de velocidade de entrada no ciclone (ou da vazão da fase gasosa) é realizado por um algoritmo proporcional-integral (PI) que compõe o supervisor do sistema de aquisição de dados e controle da UE-DC, e atua em um inversor de frequência do exaustor a jusante do aparato experimental.

Medidas de razão de carga

A vazão de alimentação de sólidos é realizada por uma rosca dosadora, conectada a um inversor de frequência que regula a entrada de sólido no sistema.

A razão de carga pode ser calculada através da razão da vazão mássica de sólidos alimentado (\dot{m}_s), pela vazão de gás (Q_g), conforme apresentado na equação 5.1.

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

Medidas de Perda de Carga

As medidas de perda de carga no ciclone obtidas através dos experimentos realizados na UE-DC são obtidas através dos sensores de medidas de perda de carga acoplados na entrada do ciclone e na saída do ciclone. Estas medidas são utilizadas nos estudos de validação do modelo.

Medidas de eficiência global de separação

A eficiência global de separação é obtida experimentalmente através da razão da massa de sólido coletada no (*underflow*) do ciclone e a massa de sólido alimentada na tremonha da UE-DC, conforme equação (2.2). A massa alimentada na tremonha e o material coletado no “*underflow*” ao final de cada experimento é medida com balança de precisão ($\pm 0,01\text{g}$).

5.3 Planejamento experimental físico

Como o presente trabalho propõe-se a estudar a influência de duas variáveis, a eficiência global de separação e perda de carga no ciclone, foi realizado um planejamento experimental resultando em 12 experimentos. As duas variáveis estudadas foram a velocidade do gás na entrada do ciclone e a razão de carga. Para cada velocidade foram feitas três réplicas de forma a avaliar a reprodutividade dos resultados a fim de se obter uma maior confiabilidade nos dados de eficiência global de separação e queda de pressão no ciclone.

Os experimentos físicos foram realizados variando as velocidades do gás na entrada do ciclone em 6, 8, 10 e 12 m/s e, as razões de carga variando entre 21-55 g/m^3 como mostra a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Planejamento experimental físico

No. Experimento	Velocidade Gás		Razão Carga do Sólido (g/m^3)
	Entrada Ciclone (m/s)		
1	6	0,00	RC _{min}
2	8	0,00	
3	10	0,00	
4	12	0,00	
5	6	28,40	RC _{méd}
6	8	24,75	
7	10	21,09	
8	12	32,07	
9	6	55,04	RC _{máx}
10	8	45,05	
11	10	38,19	
12	12	42,68	

Os experimentos apresentados na Tabela 5.2 foram executados de forma aleatória para minimizar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos.

5.4 Planejamento experimental numérico

Os experimentos numéricos no código computacional CYCLO-HEXA para o modelo euleriano-euleriano bifásico (EE_1) foram executados partindo das velocidades de entrada no ciclone e a razão de carga de sólidos que foram obtidos previamente através dos experimentos físicos na UE-DC.

Após a descrição dos materiais e metodologia utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, discute-se e avaliam-se os resultados obtidos apresentados no capítulo seguinte.

CAPÍTULO 6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados, neste capítulo, os resultados experimentais obtidos para o ciclone, de acordo com o planejamento experimental adotado, no qual são apresentados e discutidos no sentido de validação do modelo e de verificação do código de CFD CYCLO-HEXA.

Foram realizados um total de 12 experimentos com 4 velocidades de entrada do gás no ciclone e razão de carga de sólido diferentes, sendo 3 réplicas para cada velocidade e razão de carga de sólido. As réplicas são importantes na verificação da reprodutibilidade dos experimentos. Portanto, os resultados que são apresentados nas próximas seções figuram apenas valores médios das 3 réplicas.

6.1 Validação do modelo

Os resultados obtidos na realização dos experimentos numéricos com o código CYCLO-HEXA para o modelo bifásico são apresentados a seguir e comparados com valores experimentais.

6.1.1 Predição da perda de carga no ciclone

O modelo euleriano-euleriano bifásico apresentado neste trabalho foi comparado com resultados experimentais. As Figuras 6(a) e 6(b) compara a perda de carga numérica no ciclone, obtidos com o código CYCLO-HEXA com os resultados experimentais para diferentes velocidades de entrada do gás e razões de carga. Observa-se nas Figuras 6(a) e 6(b) que, as curvas de perda de carga experimental e numérica versus o número de Reynolds, com número de giros igual a 5,7 giros, ficaram muito próximas e, como esperado, a perda de carga aumenta com o aumento do Número de Reynolds (Re), que é função da velocidade de entrada do gás. Observa-se também que com a presença de sólidos, há uma redução na perda de carga e, o modelo proposto foi capaz de representar este comportamento conforme Figuras 6(a) e 6(b). Os resultados representados na Figura 6 (a) e 6 (b) são apresentados nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3.

O erro relativo máximo obtido entre a perda de carga experimental e numérica foi de 28,25%, conforme Tabelas 6.1 e 6.2. Estes resultados corroboram o modelo e estão em concordância com os

resultados obtidos anteriormente pelo grupo de pesquisa (MEIER, 1998; VEGINI, 2007; Vegini et al., 2008).

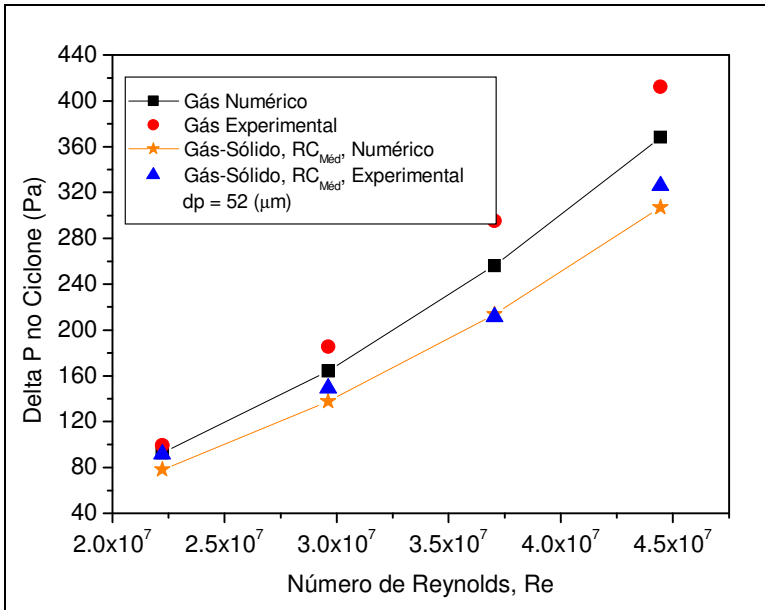


Figura 6 (a) – Comparação da perda de carga experimental com o resultado numérico com razão de carga média.

Tabela 6.1 – Comparação perda de carga experimental e numérica
Figura 6 (a)

<i>Fase Gás + Sólido - RC_{méd}</i> (dp = 52 μm)					
Velocidade	Razão	Delta P (Pa)	Delta P (Pa)	Erro Absoluto	Erro Relativo
(m/s)	Carga (g/m ³)	Experimental	Numérica	(Pa)	(%)
6	28,40	91,59	77,93	13,66	14,91
8	24,75	148,99	137,76	11,23	7,53
10	21,09	211,54	213,77	-1,61	-0,76
12	32,07	325,87	306,46	19,41	5,95

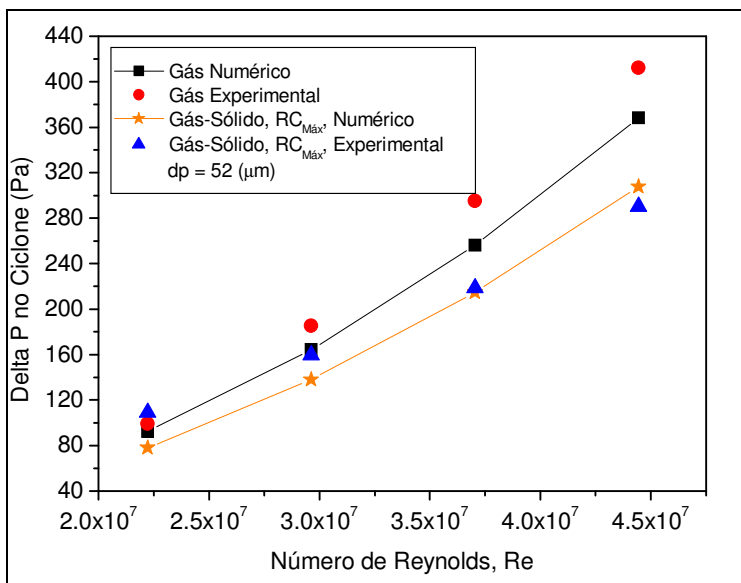


Figura 6 (b) – Comparação da perda de carga experimental com resultado numérico com razão de carga máxima.

Tabela 6.2 – Comparação perda de carga experimental e numérica Figura 6 (b)

<i>Fase Gás + Sólido - RC_{máx} (dp = 52 μm)</i>					
Velocidade (m/s)	Razão Carga (g/m ³)	Delta P (Pa) Experimental	Delta P (Pa) Numérica	Erro Absoluto (Pa)	Erro Relativo (%)
6	55,04	108,87	78,11	30,76	28,25
8	45,05	159,49	137,86	21,63	13,56
10	38,19	218,54	214,15	4,39	2,01
12	42,68	290,30	307,42	-17,12	-5,90

Tabela 6.3 – Comparação perda de carga experimental e numérica
 Figura 6 (a) e 6 (b)

<i>Fase Gás</i>				
Velocidade	Delta P (Pa)	Delta P (Pa)	Erro Absoluto	Erro Relativo
(m/s)	Experimental	Numérica	(Pa)	(%)
6	99,15	92,67	6,48	6,54
8	185,45	164,25	21,2	13,38
10	295,35	256,14	39,21	13,27
12	412,35	368,29	44,06	10,68

6.1.2 Predição da eficiência global de separação

A Figura 6.1 apresenta o resultado da eficiência global de separação numérica obtidos com o código CycloEE₁ para diferentes diâmetros de partícula. Como esperado, a eficiência global de coleta aumenta com o tamanho da partícula e, partículas com diâmetro maior que 10 µm são totalmente coletadas. Pode também ser verificado, que para uma maior velocidade de entrada do gás no ciclone, maior é a eficiência global de coleta para partículas menores que 10 µm. Para partículas acima de 15 µm a eficiência global de separação é de aproximadamente 100% tanto para velocidade de 6 m/s como para velocidade de 12 m/s.

Os resultados plotados na Figura 6.1 são apresentados na Tabela 6.4.

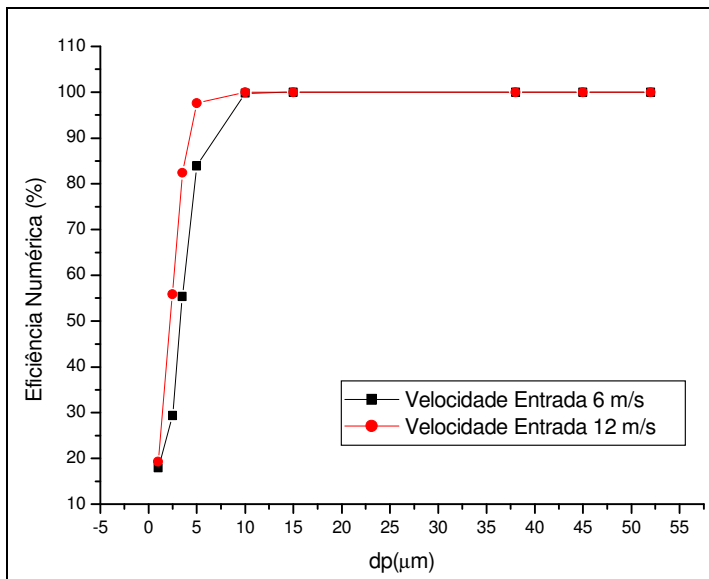


Figura 6.1 – Eficiência global de separação numérica para diferentes diâmetros de partícula

Tabela 6.4 – Eficiência global de separação numérica para diferentes diâmetros

Diâmetro Partícula (μm)	Velocidade Gás		Eficiência Numérica (%)
	Entrada Ciclone (m/s)		
1,0	6		17,89
1,0	12		19,24
2,5	6		29,39
2,5	12		55,90
3,5	6		55,38
3,5	12		82,35
5,0	6		83,88
5,0	12		97,60
10,0	6		99,81
10,0	12		99,95
15,0	6		99,99
15,0	12		99,99
38,0	6		99,99
38,0	12		99,99
45,0	6		99,99
45,0	12		99,99
52,0	6		99,99
52,0	12		99,99

A Figura 6.2 mostra que a eficiência global de separação do iodato de cálcio, com diâmetro médio de sauter igual a $52 \mu\text{m}$ é praticamente 100% conforme resultados numéricos. Porém, a precisão experimental, não foi suficiente para comparação com os resultados numéricos. O fato de não se confirmar os 100 % de eficiência nos experimentos pode ser resultado de erros experimentais associados à medida da massa alimentada e da massa coletada, a permanência de quantidades de material nas tubulações e acessórios, a utilização de pequenas quantidades de material por experimento que faz o erro aumentar. Os erros relativos da eficiência de separação experimental e numérica são apresentados na Tabela 6.5.

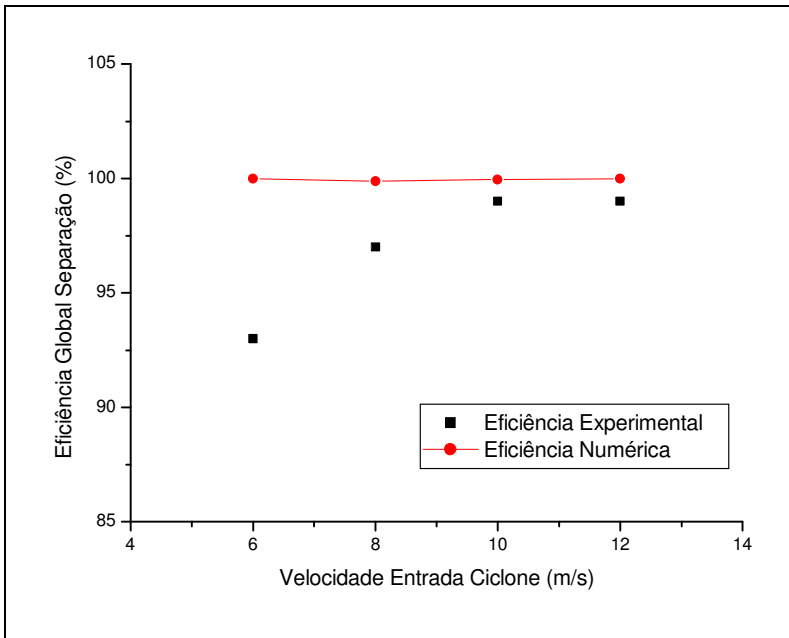


Figura 6.2 – Eficiência global de separação no ciclone em função da velocidade de entrada

Tabela 6.5 – Comparação eficiência global de separação experimental e numérica

<i>Fase Gás + Sólido</i>					
Velocidade	Razão	Eficiência (%)	Eficiência (%)	Erro Absoluto	Erro Relativo
(m/s)	Carga (g/m ³)	Experimental	Numérica	(Pa)	(%)
6	55,04	86,90	99,99	-13,09	-15,06
6	28,40	93,00	99,99	-6,99	-7,51
8	45,05	98,00	99,65	-1,65	-1,68
8	24,75	97,00	99,88	-2,88	-2,97
10	38,19	100,00	99,79	0,21	0,21
10	21,09	99,00	99,95	-0,95	-0,96
12	42,68	100,00	99,99	1,00	1,00
12	32,07	99,00	99,99	0,00	0,00

6.2 Visualização científica das predições numéricas

Com o objetivo de ilustrar a capacidade de representação do escoamento gás-sólido em ciclones com o modelo numérico EE₁ implementados no código CYCLO-HEXA, as Figuras 6.3 a 6.7, apresentam-se mapas de fração volumétrica da fase sólida, velocidade tangencial, velocidade axial e pressão no ciclone que representam uma condição padrão de escoamento diluído com velocidade na entrada de 6 m/s e razão de carga de 55 g de sólido por m³ de gás.

A inspeção minuciosa dos mapas possibilita a interpretação das principais características fenomenológicas do escoamento ciclônico numa escala microscópica, e a identificação do padrão fluidodinâmico favorável ao desempenho operacional.

6.2.1 Análise dos mapas da fração volumétrica para diferentes diâmetros de partículas

A Figura 6.3 apresenta os mapas de fração volumétrica da fase sólida, que representa, basicamente, uma distribuição de sólidos ao longo do ciclone. Verifica-se que com o aumento do diâmetro da partícula, a distribuição de sólidos desloca-se em direção à parede, o que confirma microscopicamente a informação macroscópica de eficiência de coleta global informada nas Figuras 6.3 (a) e 6.3 (b). Observa-se, principalmente nas Figuras 6.3 (a (1, 2 e 3)), que partículas de sólido são arrastadas pela corrente gasosa em direção ao topo do ciclone através do

“vórtex-finder”, causando perda de material e com isso redução da eficiência global de coleta.

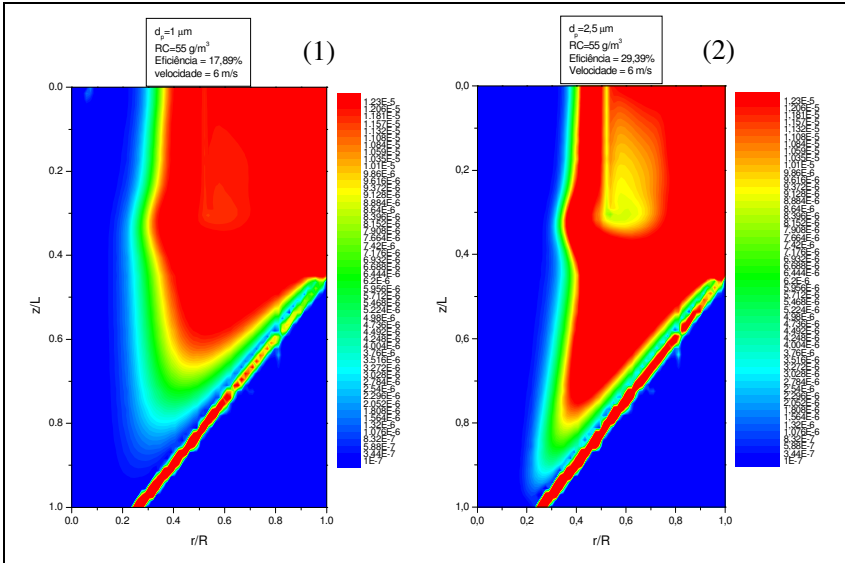


Figura 6.3 (a) – Mapa da fração volumétrica da fase sólida

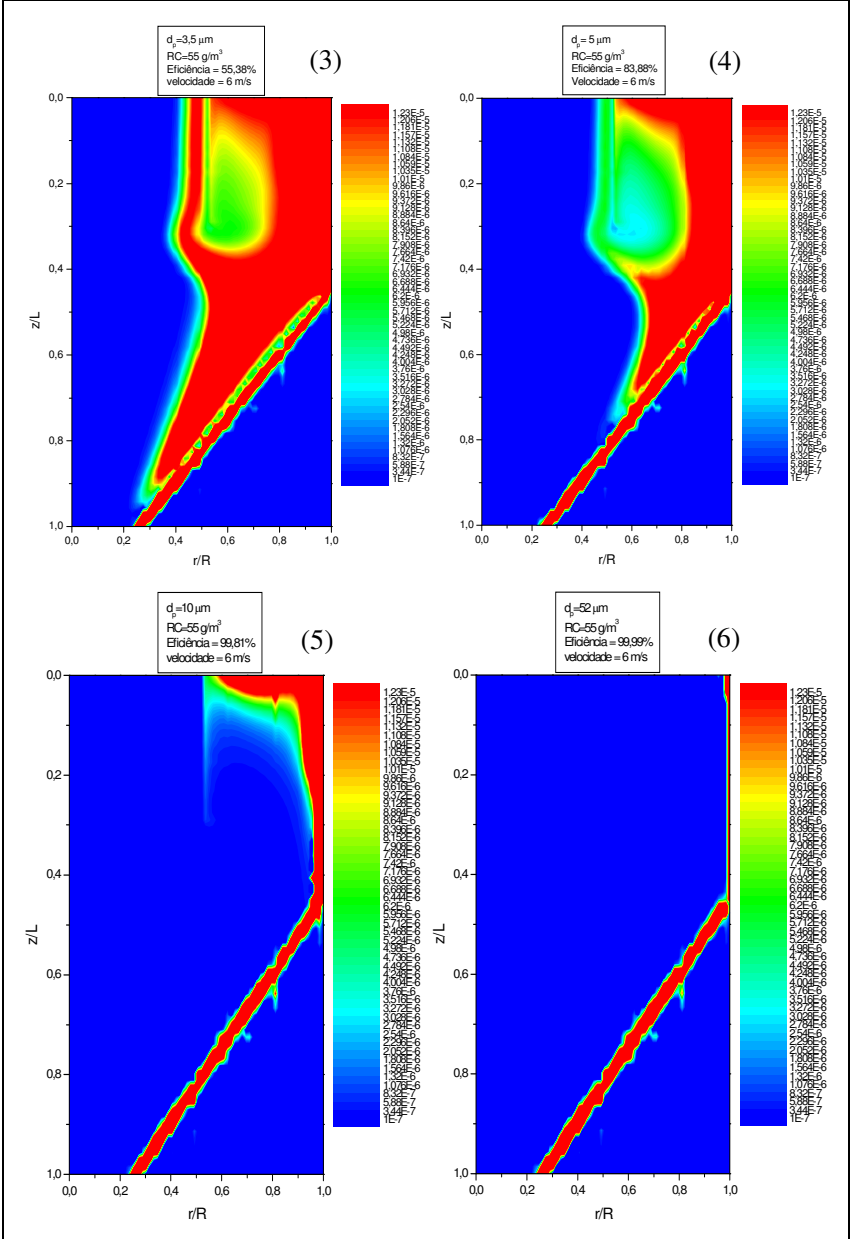


Figura 6.3 (b) – Mapa da fração volumétrica da fase sólida

6.2.2 Predição das características fenomenológicas do escoamento ciclônico

A reversão do escoamento no interior do ciclone pode ser visualizada através da Figura 6.4, onde a cor amarela representa uma região de reversão do campo de velocidade axial.

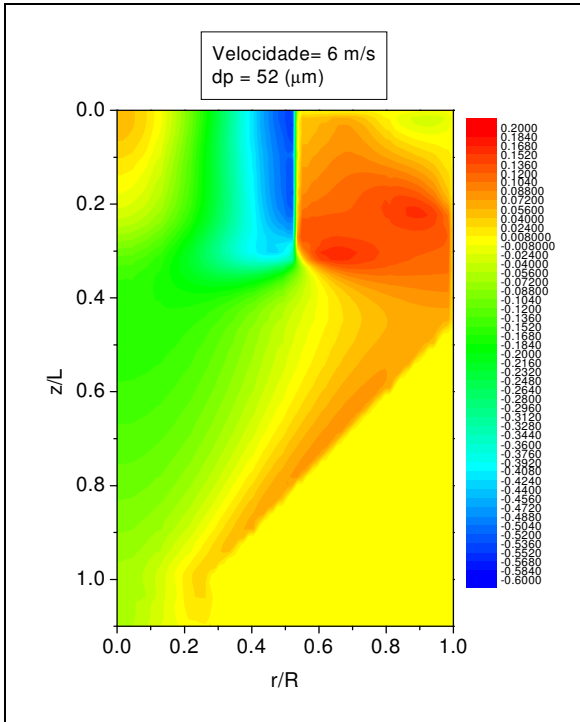


Figura 6.4 – Mapa de velocidade axial

O campo de pressão e a existência de um núcleo de baixa pressão (região em azul) podem ser visualizados na Figura 6.5. Observa-se que este núcleo é deslocado em direção a seção cônica, o que confere maior estabilidade ao escoamento ciclônico.

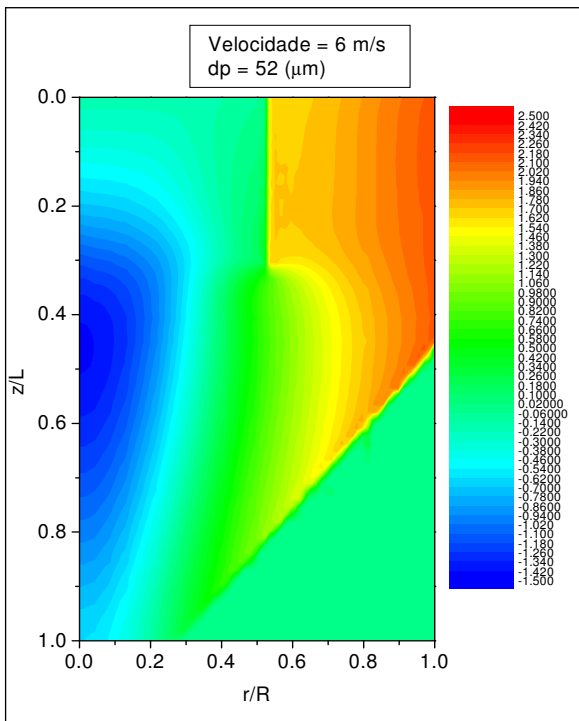


Figura 6.5 – Mapa de pressão

A Figura 6.6 apresenta o mapa de velocidade tangencial do gás e, verifica-se com clareza a existência de um escoamento giratório de alta intensidade do campo centrífugo às paredes do ciclone garantindo uma alta eficiência de coleta.

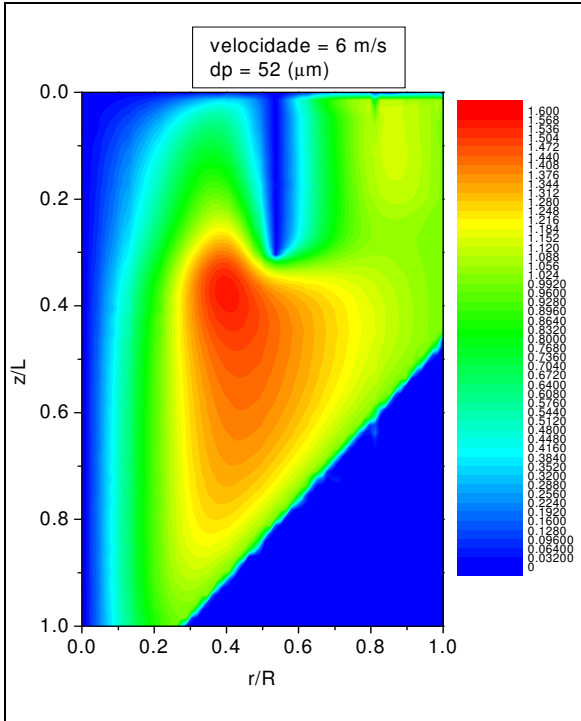


Figura 6.6 – Mapa de velocidade tangencial do gás

A Figura 6.7 apresenta o mapa de velocidade tangencial do gás com a presença de sólidos e, comparativamente com a Figura 6.5, observa-se uma diminuição da velocidade tangencial com a presença de sólidos, justificando assim uma menor perda de carga conforme apresentado nas Figuras 6 (a) e 6 (b) anteriormente.

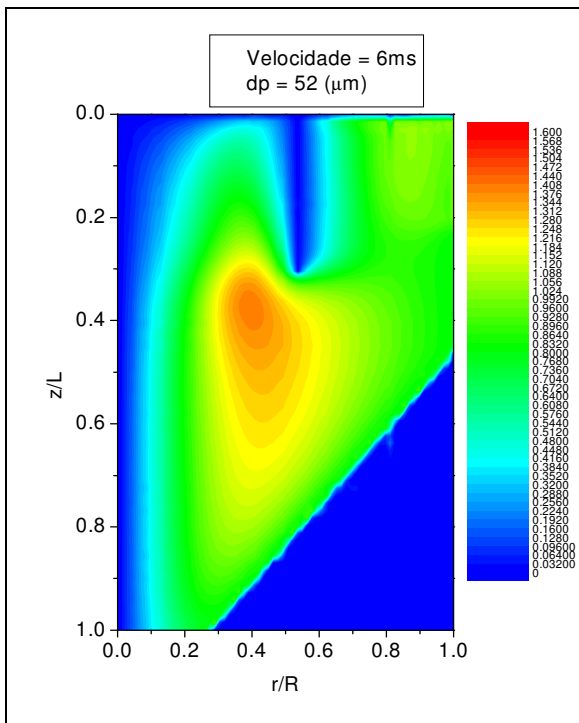


Figura 6.7 – Mapa velocidade tangencial gás-sólido

Neste estudo de CFD, que forneceram tanto informações macroscópicas de desempenho da separação gás-sólido (eficiência de coleta e perda de carga), quanto às informações microscópicas associadas às características fenomenológicas do escoamento ciclônico, pode-se concluir que a geometria do ciclone implementada no código CYCLO-HEXA (EE_1) apresentou desempenho operacional satisfatório, garantindo alta eficiência de separação e baixa perda de carga, conforme resultados obtidos e apresentados anteriormente.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1 Conclusões

A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas com este trabalho.

O sistema experimental utilizado foi adequado para a obtenção dos parâmetros utilizados para corroborar o modelo desenvolvido no programa CYCLO-HEXA (EE_1), pois a perda de carga numérica e a perda de carga experimental apresentaram resultados muito próximos.

O erro relativo máximo obtido entre a perda de carga experimental e numérica foi de 28,25%. Como os modelos fenomenológicos aplicados para prever o escoamento ciclônico possuem uma bagagem teórica considerável, erros relativos abaixo de 30% na perda de carga são suficientes para validar o modelo quantitativamente e qualitativamente.

O código computacional CYCLO-HEXA na sua versão bifásica (EE_1) permite a análise do comportamento fluidodinâmico do escoamento gás-sólido no interior dos ciclones, e conseqüentemente o desenvolvimento de projetos de ciclones com geometrias diferenciadas destinadas a processos específicos, podendo-se também otimizar as condições operacionais.

Quanto à eficiência global de separação para o estudo de caso adotado, o mesmo tem 100% eficiência, conforme resultados numéricos, porém, a precisão experimental não foi suficiente para comparação com os resultados numéricos, conforme já discutido no item 6.1.2 do capítulo anterior. Desta forma, a validação da predição da eficiência global de separação foi apenas qualitativa.

7.2 Sugestões para próximos trabalhos

Como sugestões para os próximos trabalhos sugerem-se:

- Realização de análise granulométrica através da técnica “Malvern Mastersizer”;
- Realização de novos experimentos com melhoria no sistema de alimentação de sólidos de forma a garantir o controle fino da razão de carga;

- Desenvolvimento de uma unidade experimental de ciclone com tronco cônico filtrante e avaliar a eficiência global de separação, e demais parâmetros de operação;
- Modelagem da unidade de ciclone com tronco cônico filtrante e adaptar o código computacional para a simulação do mesmo;
- Corroboração do código computacional utilizando os resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

1. ALLEN, T. Particle Size Measurement, 5th edition, V.1, London: Chapman and Hall, 1997.
2. ARAUJO, I. & MASSARANI, G. Análise do Desempenho do Ciclone a Gás Stairmand. Anais do Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, 15, vol. I, Uberlândia MG. 1987, p. 272 – 278.
3. AVEROUS, J. e FUENTES, R. *Advances in the Numerical Simulation of Hydrocyclones Classification*. Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 36, n^o 05, p. 309-317, 1997.
4. BASKAKOV, A. P., DOLGOV, V. N., GOLDOBIN, Y. M., *Aerodynamics and Heat transfer in cyclone with Particle-laden Gas Flow*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 3, p. 597-602, 1990.
5. 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.
6. BERNARDO, S., MORI, M., PERES, A. P., DIONÍSIO, R. P. *3-D Computational Fluid Dynamics for Gas and Gas-Particule Flows in a Cyclone With Different Inlet Section Angles*. Powder Technology, vol. 162, p. 190-200, 2006.
7. BOYSAN, F.; AYERS, W. H.; SWITENBANK, J. A *Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Desing*. Trans. I. Chem. E., v.60, p. 222-230, 1982.
8. CLIFT, R., M. GHADIRI, et al., *A Critique of Two Models for Cyclone Performance*, AIChE Journal, vol. 37, n^o2, p. 285-289, 1991.

9. 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, p. 103-112, 2004.
10. CRISTEA, E. D., MALFA, E., *3D Simulation and Experiments of Cement Rotary Kiln Pre-Heater Top Cyclone*. Proceedings of Fluent European User's Group Meeting, Harrogate, U. K, 18p., 9-10 June, 1994.
11. CRISTEA, E. D., COGHE, 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, June 1998.
12. DAVIDSON, M. R. *Numerical calculations of flow in a hydrocyclone operating without an air core*. Appl. Math. Modelling, v.12, p.119-128, 1988.
13. DERKSEN, J. J., *Separation Performance Predictions of a Stairmand High-Efficiency Cyclone*. AIChE Journal, vol. 49, n° 06, p. 1359-1371, 2003.
14. DUGGINS, R. K.; FRITH, P. C. W. *Turbulence Anisotropy in Cyclones*, Filtration & Separation, p. 394-397, Nov/Dec, 1987.
15. 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, p. 60-65, 2000.
16. GIDASPOW, D., *Multiphase and Fluidization: Continuum and Kinetic theory Descriptions*. San Diego: Ed. Academic Press, 1994.
17. GRIFFITHS, W. D., BOYSAN, F. *Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modelling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers*. J. Aerosol Sci., v. 27, n.2, p. 281-304, 1996.

18. HEUMANN, W.L., *Cyclone Separators: A Family Affair*. In: Chem. Eng., June, p. 118-123, 1991.
19. 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, p. 2055-2065, 1999.
20. HOFFMANN, A.C.; ARENDS, H., SIE, H. *An Experimental Investigation Elucidating the Nature of the Effect of Solids Loading on Cyclone performance*. Filtration and Separation, May/June, p. 188-193, 1991.
21. HOFFMAN, A. C., A. VANSANTEN, et al., *Effects of Geometry and Solid loading on the Performance of Gas Cyclones*. Powder Technology, vol. 70, n^o 1, p. 83-91, 1992.
22. 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, p. 799-804, 1995.
23. HUSSMANN, B., PFITZNER, M., ESCH, T., FRANK, T. *A Stochastic Particule-Particule Collision Model for Dense Gas-Particule Flows Implement in the Lagrangian Solver of ANSYS CFX and its Validation*. 6th International Conference on Multiphase Flow, Leipzig, Germany, 2007.
24. IOZIA, D. L. AND D. LEITH., *The Logistic Function and Cyclone Fractional Efficiency*, Aerosol Science Technology, vol. 12, n^o 3, p. 598-606, 1990.
25. 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, p. 251-269, 2001.
26. KOCH, W.H.; LICHT, W., *New Design Approach Boosts Cyclone Efficiency*. In: *Industrial Air Pollution Engineering*. Chemical Engineering Magazine, p. 175-183, 1977.

27. LAPPLE, C. E., *Process Use Many Collector Types*, Chemical Engineering, vol. 58, p. 144-151, 1951.
28. LEITH, D. LICHT, W., *The Collection Efficiency of Cyclone Type Particle Collectors: A New Theoretical Approach*, AIChE Symposium Ser., vol. 68, n. 126, p. 196-206, 1972.
29. LI, E. e WANG, Y., *A New Theory of Cyclone Separators*. In: AIChE. J., vol. 15, p. 666-669, 1989.
30. MADSEN, H. J., THORSTENSEN, J. H., SALIMI, P., HASSING, N. H., RUSAAS, J. *Prediction of the performance of gas cyclones*, In second CFDS International User Conference, December 1994.
31. MALISKA, C. R., SILVA, A. F. C., ANDRADE, D. *A Strong Coupling Procedure for the Segregated Solutions of Rotating Flows*, Separation Phenomena in Liquids and Gases, Ed. H. G. Wood, University of Virginia, 1992.
32. MASSAH, H and OSHINOWO, L.; *Advanced Gas-Solid Multiphase Flow Models Offer Significant Process Improvements*, Journal Articles by Fluent Software Users, 2000.
33. MASSARANI, G., *Problemas em Sistemas Particulados*, Editora Edgar UFRJ Editora, Rio de Janeiro, 1997, p. 47-77.
34. MASSARANI, G., *Fluidodinâmica em sistemas particulados*/Giulio Massarani – 2ª. Edição – Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.
35. MEIER, H. F. *Modelagem fenomenológica e simulação bidimensional de ciclones por técnicas da fluidodinâmica computacional*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1998.
36. MEIER, H. F.; MORI, M. *Computational Fluid Dynamics Techniques for Gas Flow in Cyclones*, 4th CFX International Users Conference, Chicago – USA, 1997.

37. MEIER, H. F.; MORI, M. *Modeling and Simulation of the Turbulent Gas Flow in a Cyclone Separator*, Actas Del 3er Congreso Interamericano de Computacion Aplicada a la Industria de Procesos, Cordoba, Argentina, p. 193-198, 1996.
38. MEIER, H. F.; MORI, M. *Gas-Solid Flow in Cyclones: The Eulerian-Eulerian Approach*, Submitted and accepted for presentation on ESCAPE 8-Belgium on May 1998, and accepted for publication in the Computer & Chemical Engineering, 1998.
39. MEIER, H. F.; MORI, M. *Anisotropic Behavior of the Reynolds Stress in Gas and Gas-solid Flows in Cyclones*. J. Powder Technol., v. 101, p. 108-1119, 1999.
40. 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.
41. MOTHESS, H. e LOFFLER, F. *Prediction of Particle Removal in Cyclone Separators*. Int. Chem. Eng., vo. 28, p. 231-240, 1988.
42. 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, p. 93-101, 2004.
43. NOWAKOWSKI, A. F., KRAIPECH, W., WILLIAMS, R. A., DYAKOWSKI, T. *The Hydrodynamics of a Hydrocyclone based on a Three-Dimensional Multi-Continuum Model*. Chem. Eng. Journal, v.80, p.275-282, 2000.
44. OGAWA, A., *Mechanical Separation Process and flow patterns of Cyclone Dust Collectors*. Ind. Applied Mech. Ver., vol. 50, n° 03, p. 97-130, 1997.
45. PERES, A. P. *Técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) Aplicadas a Escoamentos em Ciclones*. Tese de Doutorado, FEQ/UNICAMP, Campinas, 2002.

46. PERICLEOUS, K. A. *Mathematical Simulation of Hydrocyclones*, Appl. Math. Modelling, v.11, p.242-255, 1987.
47. SILVA, M. A., NEBRA, S. A., *Simulação da Transferência de Calor no Ciclone*, XXII ENEMP - Vigésimo Segundo Encontro sobre Meios Porosos, Florianópolis, SC, Brasil, p. 251-528, 1994.
48. SHEPHERD, C.B.; LAPPLE, C.E. *Flow Pattern and Pressure Drop in Cyclone Dust Collectors*. Industrial and Engineering Chemistry, v. 31, p. 972-984, 1939.
49. STAIRMAND, C.J. *The Design and Performance of Cyclone Separators*. Trans. Instr. Chem. Engrs, v.29, p. 356-373, 1951.
50. VEGINI, A. A. *Modelagem multifásica euleriana-euleriana para simulação numérica de ciclones*. Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2007.
51. VEGINI, A. A., MEIER, H. F., IESS, J. J., MORI, M. *Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of Cyclone Separators Connected in Series* Industrial & Engineering Chemistry Research, vol. 47, p. 192-200, 2008.
52. YUU, et al., *The Reduction of Pressure Drop due to dust Loading in a Conventional Cyclone*. Chemical Engineering Science, vol. 33, p. 1573-1580, 1978.
53. 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, p. 273-280, 1997.
54. ZHAO, B., SU, Y., ZHANG, J. *Simulation of Gas Flow Pattern and Separation Efficiency in Cyclone Whit Conventional Single and Spiral Double Inlet Configuration*. Chemical Engineering Research and Design, vol. 84, p. 1165, 2006.
55. ZHOU, L. X.; SOO, S. L. *Gas-Solid Flow and Collection of Solids in a Cyclone Separator*. Powder Technology, v. 63, p. 45-53, 1990.